

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ESTUDIO DE LA PENETRACIÓN ARMÓNICA EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN CON PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES**



Volumen I

Memoria

Autor:	Barreiro Vázquez, Miguel
Autor:	Santandreu Vidal, Oscar
Director:	Mesas García, Juan José
Codirector:	Sainz Sopera, Luis
Convocatoria:	Enero 2018

Resum

En aquest projecte s'abordarà un dels problemes principals que afecten a la qualitat de les xarxes de distribució, les càrregues no lineals connectades a la xarxa.

En les últimes dècades, el nombre de càrregues no lineals connectades a la xarxa de distribució ha augmentat notablement.

Les càrregues no lineals són aquelles que, alimentades a tensió sinusoidal, consumeixen un corrent distorsionat. Aquest corrent, quan circula a través dels diferents elements d'una xarxa de distribució, provoca l'aparició de caigudes de tensió distorsionades, la qual cosa comporta l'aparició de tensions també distorsionades en els busos d'aquesta xarxa.

L'objectiu d'aquest projecte és l'anàlisi d'una xarxa de distribució amb presència de càrregues no lineals connectades als seus busos.

Finalment, l'estudi del projecte permetrà extreure conclusions sobre els efectes que té sobre una xarxa de distribució la connexió massiva de càrregues no lineals als seus busos i oferir un programa per a l'anàlisi de mesures correctores que puguin mitigar aquells efectes que resultin perjudicials per a aquesta xarxa.



Resumen

En este proyecto se abordará uno de los problemas principales que afectan a la calidad de las redes de distribución, las cargas no lineales conectadas a la red.

En las últimas décadas, el número de cargas no lineales conectadas a la red de distribución ha aumentado notablemente.

Las cargas no lineales son aquellas que, alimentadas a tensión sinusoidal, consumen una corriente distorsionada. Esta corriente, cuando circula a través de los diferentes elementos de una red de distribución, provoca la aparición de caídas de tensión distorsionadas, lo que conlleva la aparición de tensiones también distorsionadas en los buses de dicha red.

El objetivo de este proyecto es el análisis de una red de distribución con presencia de cargas no lineales conectadas a sus buses.

Finalmente, el estudio del proyecto permitirá extraer conclusiones acerca de los efectos que tiene sobre una red de distribución la conexión masiva de cargas no lineales a sus buses y ofrecer un programa para el análisis de medidas correctoras que puedan mitigar aquellos efectos que resulten perjudiciales para dicha red.



Abstract

In this project will address one of the main problems that affect to the quality of the networks of distribution, the no linear loads connected to the network.

In the last decade, the numeral of loads of loads no linear connected to the network of distribution has increased notably.

The no linear loads are those that, fed to sinusoidal tension, consume a current distorted. This current, when circulates through the different elements of a network of distribution, causes the apparition of falls of tension distorted, which thing comports the apparition of tensions also distorted in the buses of this network.

The aim of this project is the analysis of a network of distribution with presence of loads no linear connected to his buses.

Finally, the study of the project will allow to extract conclusions on the effects that has on a network of distribution the massive connection of loads no linear to his buses and offer a program for the analysis of corrective measures that they can mitigate those effects that result hurtful for this network.



Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a Juan José Mesas su paciencia, dedicación y ayuda prestada tanto con este proyecto como en sus asignaturas.

En segundo lugar, queremos agradecer tanto a amigos, familiares y compañeros por la confianza depositada en nosotros durante esta etapa de nuestras vidas.



Índice

RESUM	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
AGRADECIMIENTOS	VII
1. PREFACIO	1
1.2. Motivación	1
1.3. Origen del trabajo	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del proyecto.....	3
2.2. Alcance del proyecto.....	3
2.3. Trabajo realizado por cada autor en el marco del proyecto.....	3
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
3.1. Valor medio de una señal periódica	5
3.2. Valor eficaz de una señal periódica	5
3.3. Distorsión de una señal sinusoidal	5
3.4. Indicadores de la distorsión armónica.....	7
3.4.1. Valor eficaz (Root mean square value)	7
3.4.2. Distorsión armónica individual (Individual harmonic Distortion).....	8
3.4.3. Espectro armónico (Harmonic spectrum).....	8
3.4.4. Distorsión armónica total (Total harmonic distortion).....	8
3.5. Potencia en regímenes periódicos no sinusoidales de componente continua nula	9
4. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS CARGAS NO LINEALES	11
4.1. Causas de los armónicos de corriente	12
4.2. Causas de los armónicos de corriente	13
4.2.1. Caídas de tensión.....	13
4.2.2. Resonancias	15
4.3. Efectos derivados de la presencia de armónicos	17
4.3.1. Efectos sobre los condensadores.....	17
4.3.2. Efectos sobre los motores	17

4.3.3.	Efectos sobre las medidas eléctricas	17
4.3.4.	Efectos sobre los equipos electrónicos	18
4.3.5.	Efectos sobre los cables	19
4.3.6.	Efectos sobre los grupos electrógenos.....	20
4.4.	Normativa que regula los niveles de armónicos.....	20
4.5.	Soluciones para mitigar los efectos armónicos.....	23
4.5.1.	Posicionar las cargas no lineales aguas arriba en el sistema eléctrico de potencia	24
4.5.2.	Agrupar las cargas no lineales, alimentando el grupo mediante una línea dedicada	24
4.5.3.	Alimentar las cargas no lineales a través de transformadores dedicados.....	25
4.5.4.	Instalar filtros	26
5.	MODELIZACIÓN DEL SISTEMA	31
5.1.	Red de alimentación	31
5.2.	Líneas aéreas y cables.....	32
5.3.	Transformadores	33
5.4.	Consumos	34
5.4.1.	Carga lineal.....	34
5.4.2.	Carga agregada no lineal.....	34
5.4.3.	Batería de condensadores	35
5.5.	Reducciones y PU.....	35
6.	MÉTODO DE CÁLCULO	37
6.1.	Penetración armónica	38
6.1.1.	Nodos del sistema	38
6.1.2.	Construcción de la matriz de admitancias Y.....	40
6.1.3.	Construcción del vector de intensidades inyectadas (I).....	41
6.1.4.	Resolución	41
7.	EQUIPMENT HARMONIC DATABASE (PANDA)	43
8.	CONSTRUCCIÓN DE LA CARGA AGREGADA NO LINEAL	45
8.1.	Cargas no lineales integrantes de la carga agregada	45
8.1.1.	Lámpara fluorescente compacta (CFL)	45
8.1.2.	Lámpara de diodo emisor de luz (LED)	47
8.1.3.	Ordenador personal (PC)	48
8.2.	Carga agregada no lineal resultante.....	50

9.	ESTUDIOS DE PENETRACIÓN ARMÓNICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN	53
9.1.	Escenario 1	53
9.1.1.	Datos asociados a todos los elementos de la red	53
9.1.2.	Análisis de los resultados obtenidos	58
9.2.	Escenario 2	67
9.2.1.	Datos asociados a todos los elementos de la red	67
9.2.2.	Análisis de los resultados obtenidos	72
10.	PRESUPUESTO	83
10.1.	Coste de los recursos humanos	83
10.2.	Coste de los recursos materiales	84
10.3.	Coste total del proyecto.....	84
11.	IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	85
12.	CONCLUSIONES	87
13.	BIBLIOGRAFÍA	89

1. Prefacio

1.2. Motivación

En las últimas décadas, a raíz del gran avance tecnológico que se está produciendo, el número de dispositivos contaminantes conectados a la red de distribución ha aumentado notablemente. Todo ello ha llevado a elevar la preocupación por el estado y la calidad del sistema eléctrico e intentar lograr objetivos para mejorar la eficiencia del sistema.

Dicha contaminación es debido a que los dispositivos con cargas no lineales (dispositivos basados en silicio, lámparas de descarga e inductancias saturables) son alimentados a tensión sinusoidal consumen una corriente distorsionada o no sinusoidal. Cuando esta corriente circula a través de los diferentes elementos de una red de distribución, provoca la aparición de caídas de tensión distorsionadas, lo que conlleva la aparición de tensiones también distorsionadas en los buses de dicha red, creando un desgaste excesivo pudiendo llegar a la inutilización de dichos dispositivos.

Este problema se encuentra ya en estudio, se han expuesto distintas publicaciones científicas, las cuales abordan el problema llegando a proponer modelizaciones de algunos de estos dispositivos [1] y proponiendo distintos métodos de cálculo para poder predecir el comportamiento de la red al ser conectada a diferentes cargas no lineales. Por otra parte, hay instituciones que trabajan en la realización de un registro de distintas cargas contaminantes y así predecir el comportamiento de la red al conectarle distintas cargas.

Un gran número de dichas instituciones trabajan en común para lograr una gran base de datos de dichas cargas “*equiPment hArmoNic DAtabase*” (PANDA) en su origen creada por la Technische Universität Dresden (Alemania).

La idea es poder componer una herramienta para el cálculo de la penetración armónica en redes de distribución aprovechando la amplia información sobre las cargas no lineales que proporciona dicha base de datos.

1.3. Origen del trabajo

El proyecto surge a raíz del interés de indagar un poco más en las redes de distribución. Se crea el proyecto a través de la unión de dos amigos del grado de ingeniería eléctrica con la misma idea de realización de un proyecto. El tutor J.J. Mesas decide a partir de dos reuniones por separado unirnos para el proyecto, ofreciéndonos dicho proyecto a los dos.

El tutor lo que nos propone a partir de tres cargas no lineales cuyos registros de corriente consumida se hallan en la base de datos de PANDA, crear cargas agregadas no lineales que se conectarán a una red de distribución típica y generar un programa para poder visualizar el estado y calidad del suministro eléctrico de dicha red para a posteriori intentar lograr objetivos de mejora.

Para dar forma a la red de distribución utilizada en el proyecto se coge como referencia el artículo de la revista del instituto de ingeniería y Tecnología (IET) "LED lamp modelling for harmonic studies in distribution systems" publicado en Enero de 2017, el cual uno de los autores del artículo es el tutor del proyecto J.J.Mesas [7].

En el artículo se presentan los problemas originados por el impulso que se le ha dado al uso de las lamparas LED en redes de distribución. Dichas lamparas son cargas no lineales que lo que hacen es introducir corrientes armónicas en las redes de distribución provocando la disminución de la calidad del suministro eléctrico en dichas redes.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El proyecto tiene por objetivo el análisis de una red de distribución con presencia de cargas no lineales conectadas a sus buses, aprovechando las medidas proporcionadas por la base de datos PANDA.

Para representar las cargas no lineales, el programa facilitará el acceso a la base de datos PANDA para consultarla y usar sus datos de consumo de las cargas para nuestro proyecto. Dicha base de datos nos ayudara a crear cargas agregadas no lineales y realizar un programa para el análisis de medidas correctoras que puedan mitigar aquellos efectos que resulten perjudiciales para la red en estudio.

El proyecto que se realizará permitirá extraer conclusiones acerca de los efectos que tiene sobre una red de distribución la conexión masiva de cargas no lineales a sus buses.

2.2. Alcance del proyecto

El estudio que se pretende realizar supone:

- La implementación de una red de distribución tipo representativa de las redes de distribución existentes en la actualidad.
- Saber interpretar la naturaleza y propagación de la contaminación armónica a través de la red de distribución eléctrica.
- Observar los registros de corrientes consumidas por diversos tipos de cargas no lineales obtenidos de la base de datos "equiPment hArmoNic DATabase" (PANDA) creada por la Technische Universität Dresden (Alemania).
- Utilizar la penetración armónica como formulación del problema de flujo armónico de cargas al cual se debe hacer frente para obtener las tensiones fundamentales y armónicas en todos los buses de la red de distribución.

2.3. Trabajo realizado por cada autor en el marco del proyecto

El trabajo asociado a este proyecto ha sido desarrollado conjuntamente por los dos autores del mismo. Así pues, ambos autores conocemos en profundidad la totalidad del trabajo. No obstante, nos repartimos la responsabilidad del trabajo realizado de la siguiente manera:

Miguel Barreiro Vázquez se hace responsable de los capítulos 3, 4, 9, 10 y 11.

Oscar Santandreu Vidal se hace responsable de los capítulos 5, 6, 7, 8, 12 y anexo.

3. Fundamentos teóricos

En el presente capítulo se revisarán una serie de conceptos necesarios para la comprensión de los temas que se desarrollarán a lo largo de este documento.

3.1. Valor medio de una señal periódica

Se denomina **valor medio de una señal periódica $x(t)$ de período T** al promedio de todos los valores que toma dicha señal a lo largo de ese período.

$$X_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (Ec. 3.1)$$

Si la señal periódica es sinusoidal, su valor medio es nulo.

3.2. Valor eficaz de una señal periódica

Se denomina **valor eficaz de una señal periódica $x(t)$ de período T** a la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de dicha señal a lo largo de ese período.

$$X = X_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (Ec. 3.2)$$

Si la señal periódica es sinusoidal, su valor eficaz es $X_{max}/\sqrt{2}$.

3.3. Distorsión de una señal sinusoidal

El teorema de Fourier establece que bajo ciertas condiciones (que se suelen cumplir en la práctica para un gran número de funciones) una función periódica no sinusoidal puede descomponerse en una suma infinita de funciones (serie de Fourier) formada por:

- una función constante (componente continua).
- una función sinusoidal de frecuencia f (componente fundamental).

infinitas funciones sinusoidales de frecuencia múltiplo entero de f (*componentes armónicas* o, simplemente, *armónicos*), denominándose **armónico de orden k** o **k -ésimo armónico** la componente sinusoidal cuya frecuencia es k veces la frecuencia de la componente fundamental.

Esta descomposición queda expresada matemáticamente mediante la ecuación:

$$x(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot X_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_{X_k}) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde:

$x(t)$ es la función periódica objeto de la descomposición.

X_0 es la componente continua, que corresponde al valor medio de $x(t)$.

$\sqrt{2} \cdot X_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_{X_k})$ son las componentes sinusoidales (fundamental y armónicas), viniendo caracterizada cada una de ellas por:

$X_k \rightarrow$ valor eficaz de la k -ésima componente sinusoidal.

$k\omega \rightarrow$ frecuencia angular (pulsación) de la k -ésima componente sinusoidal, siendo k el orden de dicha componente.

$\varphi_{X_k} \rightarrow$ fase de la k -ésima componente sinusoidal.

Así pues, conocida la descomposición en serie de Fourier de una función periódica no sinusoidal, puede calcularse el valor eficaz de dicha función haciendo uso de un procedimiento alternativo al ya descrito mediante la expresión matemática (3.2) y que se expone a continuación (también en forma de expresión matemática):

$$X = X_{\text{eficaz}} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} X_k^2} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

La componente continua junto con las componentes sinusoidales armónicas de una señal periódica constituye la **distorsión de su componente sinusoidal fundamental**. La parte de esa distorsión debida a las componentes sinusoidales armónicas se denomina **distorsión armónica**. La *Figura 3.1* muestra un ejemplo de una onda sinusoidal de corriente afectada únicamente por distorsión armónica, resultando una señal periódica de corriente de valor medio nulo (sin componente continua).

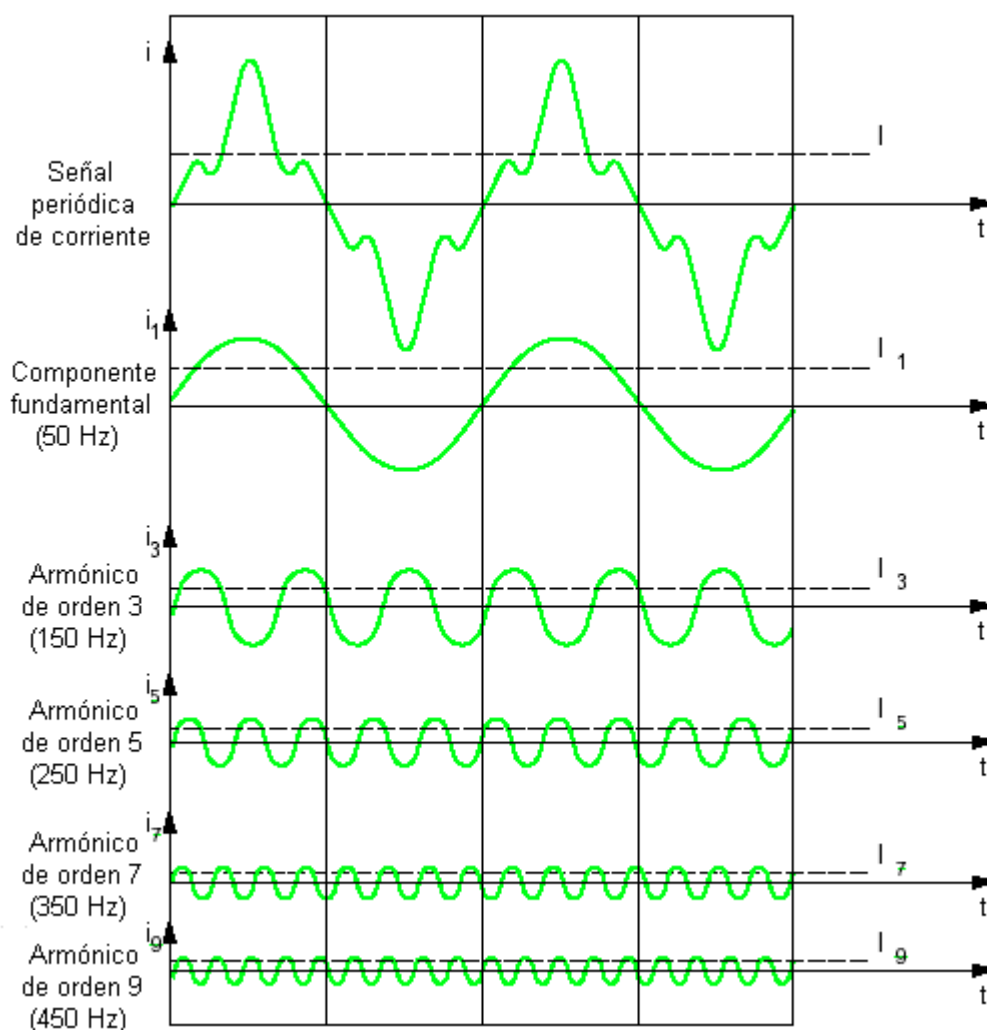


Figura 3.1. Ejemplo de una señal periódica de corriente de valor eficaz I con contenido armónico. Descomposición de la misma en su componente fundamental y sus armónicos de valores eficaces I_k

3.4. Indicadores de la distorsión armónica

De todos los indicadores existentes para cuantificar y valorar la distorsión armónica de ondas sinusoidales, los que se detallan a continuación serán los empleados a lo largo de este documento.

3.4.1. Valor eficaz (Root mean square value)

El **valor eficaz**, para el caso de ondas sinusoidales afectadas únicamente por distorsión armónica, se define a partir de (3.4) adoptando $k \geq 1$.

$$X = X_{eficaz} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} X_k^2} \quad (Ec. 3.5)$$

3.4.2. Distorsión armónica individual (Individual harmonic Distortion)

La **distorsión armónica individual de orden k** se define como el cociente entre el valor eficaz de la componente armónica k y el valor eficaz de la componente fundamental (en tanto por ciento).

$$HD_{X_k} = \frac{X_k}{X_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Ec. 3.6})$$

3.4.3. Espectro armónico (Harmonic spectrum)

El espectro armónico se define como la representación gráfica de los valores de distorsión armónica individual en función del orden del armónico. Esta representación gráfica acostumbra a incorporar la distorsión “armónica” individual (= 100 %) de la componente fundamental (como si de un armónico más se tratase) cuando ello no da lugar a problemas de escala.

Los espectros armónicos asociados a las funciones periódicas no sinusoidales son espectros discretos o de rayas. Así pues, para que la presencia de dichos espectros sea más vistosa, suelen emplearse para su representación diagramas de barras. Sirva como ejemplo el que se muestra en la Figura 3.2, que corresponde al de una señal del tipo onda cuadrada.

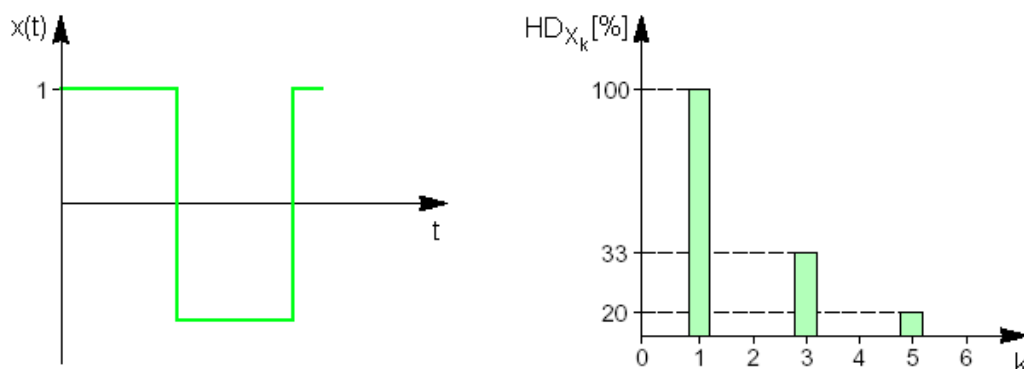


Figura 3.2. Señal del tipo onda cuadrada y su espectro armónico (se han representado en él las distorsiones armónicas individuales de mayor valor).

3.4.4. Distorsión armónica total (Total harmonic distortion)

La **distorsión armónica total** se define como la raíz cuadrada del sumatorio de los cuadrados de las distorsiones armónicas individuales en tanto por ciento.

$$THD_X = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} HD_{X_k}^2} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_k^2}}{X_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (Ec. 3.7)$$

3.5. Potencia en regímenes periódicos no sinusoidales de componente continua nula

Los regímenes periódicos no sinusoidales habituales en Electrotecnia suelen tener valor despreciable o nulo de componente continua. Así pues, sea una carga (lineal o no) excitada con una tensión:

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_{V_k}) \quad (Ec. 3.8)$$

y que es atravesada por una corriente:

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_{I_k}) \quad (Ec. 3.9)$$

Se define **potencia activa** como:

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos(\varphi_{V_k} - \varphi_{I_k}) \quad (Ec. 3.10)$$

y, adoptando una de las múltiples definiciones que se hallan en la literatura, **potencia reactiva** como:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos(\varphi_{V_k} - \varphi_{I_k}) \quad (Ec. 3.11)$$

Además, se denomina **potencia aparente** al producto de los valores eficaces de la tensión y la corriente:

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad (Ec. 3.12)$$

A la vista de (3.10), (3.11) y (3.12) es fácil comprobar que no se cumple la igualdad:

$$P^2 + Q^2 = S^2 \quad (Ec. 3.13)$$

propia de regímenes periódicos sinusoidales. Se define pues, para regímenes periódicos no sinusoidales, la **potencia de distorsión** como:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (Ec. 3.14)$$

y, dado que no se está considerando la existencia de componente continua, podrá denominarse **potencia de distorsión armónica** propiamente.

4. Problemática asociada a las cargas no lineales

Tal como ya se ha comentado, en los sistemas eléctricos de potencia cada vez es más frecuente y numerosa la presencia de **cargas no lineales**: cargas que, excitadas con tensión sinusoidal, consumen corriente no sinusoidal, aunque, por lo general, periódica (corriente con contenido armónico).

Seguidamente se presenta una lista con las más importantes (no pretende ser exhaustiva), clasificadas en tres categorías:

A- Basadas en arcos y descargas eléctricas →

- Lámparas de descarga (fluorescentes, ahorradoras de energía, neón, vapores de sodio y mercurio, etc.).
- Soldadores de arco.
- Hornos de arco.

B- Basadas en inductancias saturables →

- Transformadores.
- Motores.
- Reactancias para limitar los arcos de descarga.

C- Electrónicas →

- Rectificadores para cargas resistivas e inductivas.
- Fuentes de alimentación (aparatos electrónicos domésticos y de oficina, variadores de frecuencia, sistemas de alimentación ininterrumpida, lámparas electrónicas, etc.).
- Reguladores y recortadores (variación de velocidad de pequeños motores, ahorradores de energía para motores, reguladores de luz, compensadores estáticos de energía reactiva (SVC, TCR), reguladores para dispositivos de caldeo, etc.).
- Cargadores de baterías.
- Cicloconvertidores.
- Convertidores continua-alterna sobre la red (energía solar, accionamientos con recuperación de energía, cascadas hiposíncronas, transmisión de energía en corriente continua, etc.).

El hecho de que cargas no lineales formen parte de un sistema eléctrico de potencia conlleva la **aparición de armónicos de corriente y de tensión** en el seno del mismo. Conocer las causas de esos armónicos, los efectos derivados de su presencia, la normativa que regula sus niveles y las soluciones

para mitigar sus efectos servirá de punto de partida para establecer qué estudios interesa realizar sobre este tipo de cargas.

4.1. Causas de los armónicos de corriente

Las cargas lineales, cuando son excitadas con tensión sinusoidal, consumen corriente también sinusoidal (corriente sin contenido armónico). La relación entre la tensión aplicada y la corriente consumida se expresa gráficamente mediante la línea de carga (o característica $u-i$). La que se muestra en la Figura 4.1 corresponde a una carga lineal puramente resistiva.

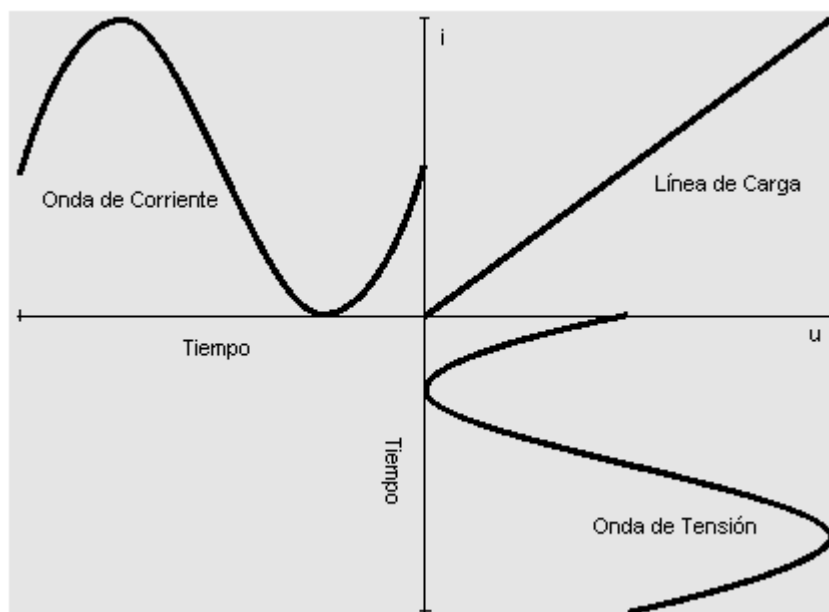


Figura 4.1. Corriente consumida y línea de carga (una recta) correspondientes a una carga lineal puramente resistiva.

Si la carga lineal fuera reactiva, la corriente consumida estaría desfasada con respecto a la tensión aplicada, por lo que la línea de carga resultante sería una elipse (o una circunferencia eventualmente).

Así pues, empleando el concepto de línea de carga, puede contemplarse una definición alternativa a la ya dada al comienzo de este capítulo para las *cargas no lineales* y es la que sigue: cargas cuya línea de carga no corresponde a una recta, una elipse o una circunferencia. Sirva como ejemplo de este tipo de líneas de carga la que se muestra en la Figura 4.2, que corresponde a un rectificador monofásico de onda completa con filtro capacitivo.

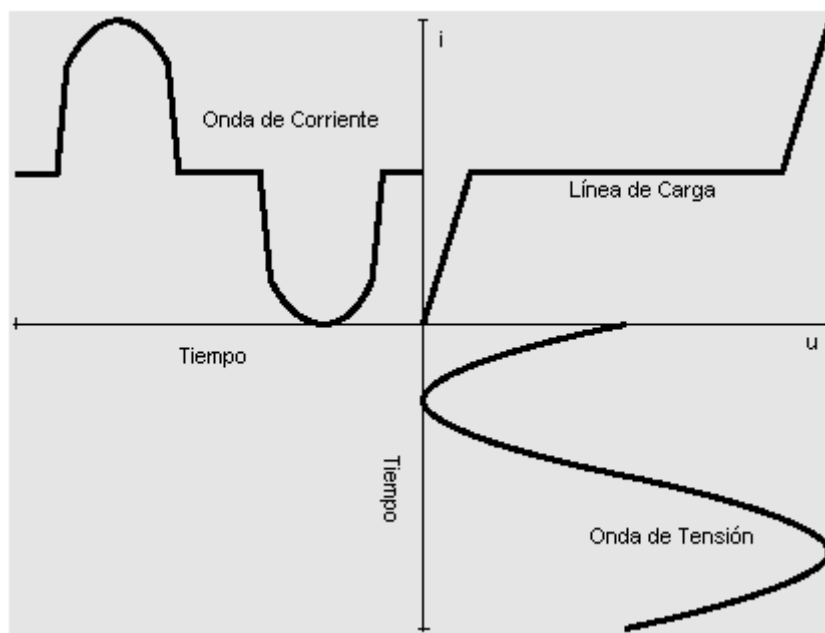


Figura 4.2. Corriente consumida y línea de carga (lineal a tramos) correspondientes a un rectificador monofásico de onda completa con filtro capacitivo. El consumo de corriente tiene lugar sólo cuando la tensión de alimentación supera a la tensión del condensador que hace de filtro.

En la práctica, las líneas de carga asociadas a cargas no lineales acostumbran a tener una forma mucho más compleja que la mostrada en la Figura 4.2, pudiendo presentar asimetrías, histéresis, además de una gran cantidad de puntos singulares y variedad de pendientes; todo ello en función de los parámetros de las propias cargas no lineales.

Por tanto, la causa de los armónicos de corriente hay que buscarla en la *forma de las líneas de carga asociadas a las cargas no lineales*, responsable de que el carácter sinusoidal de la tensión aplicada no se transmita a la corriente consumida [1].

4.2. Causas de los armónicos de corriente

Las centrales eléctricas generan una tensión que puede considerarse sinusoidal perfecta para casi todas las aplicaciones. A pesar de ello, en el seno del sistema eléctrico de potencia aparecen armónicos de tensión cuando forman parte de él cargas no lineales. Estos armónicos vienen causados por *las caídas de tensión* y pueden verse amplificados o atenuados por *las resonancias* [2].

4.2.1. Caídas de tensión

En la Figura 4.3 puede apreciarse una carga lineal alimentada desde una fuente de tensión sinusoidal (fuente que representa la tensión en bornes del generador de la central). La tensión en bornes de la

carga (en PCC –punto de conexión común– si se tienen dos o más cargas conectadas en paralelo) es, en principio, más pequeña que la tensión en bornes del generador debido a la caída de tensión en la línea de alimentación. Tratándose de una carga lineal, la corriente y, por tanto, las caídas de tensión son sinusoidales, de forma que la tensión en bornes de la carga (en PCC) también es sinusoidal.

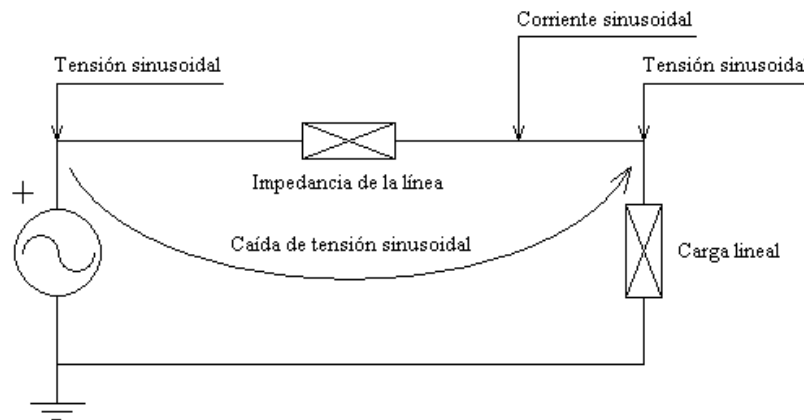


Figura 4.3. Caída de tensión cuando la carga es lineal.

En cambio, tal como se muestra en la Figura 4.4, cuando la carga es no lineal, la corriente y, por tanto, la caída de tensión está distorsionada, de forma que la tensión en bornes de la carga (en PCC) también está distorsionada.

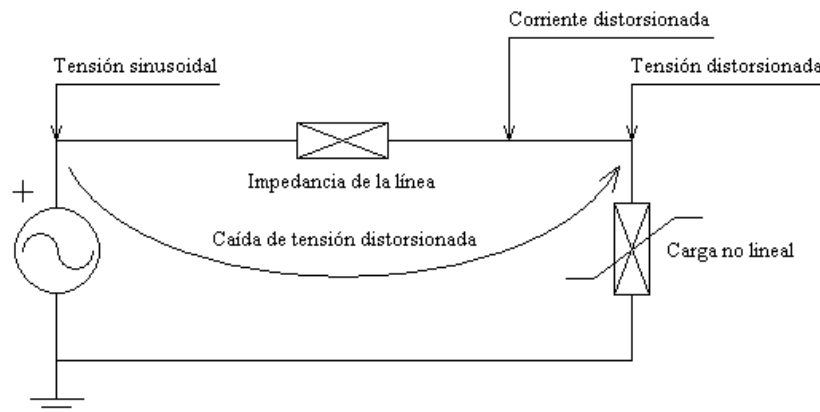


Figura 4.4. Caída de tensión cuando la carga es no lineal.

La mayor parte de la caída de tensión en una línea se produce en los cables y transformadores, de forma que puede considerarse que dicha caída de tensión es básicamente inductiva. Dado que la reactancia inductiva crece con la frecuencia ($X_L = \omega \cdot L$), se tiene que la caída de tensión aumenta con el orden del armónico; sin embargo, debe tenerse presente que las componentes armónicas de

la corriente distorsionada suelen tener una magnitud más pequeña cuanto mayor es su frecuencia. Es por ello por lo que, en principio, los armónicos de tensión derivados de caídas de tensión distorsionadas no suelen ser muy elevados.

4.2.2. Resonancias

Cuando en el sistema eléctrico de potencia hay además condensadores (en paralelo con la carga no lineal y sea compensando potencia reactiva, sea formando parte de un filtro o ambas cosas a la vez), los armónicos de tensión derivados de caídas de tensión distorsionadas pueden verse amplificados o atenuados si se producen resonancias. Pueden presentarse resonancias de dos tipos:

- Resonancia paralelo o antirresonancia → Entre la inductancia equivalente generador-línea y el condensador (forme parte o no de un filtro), pues vistos desde la carga no lineal (desde el PCC) se hallan en paralelo, tal como se aprecia en la Figura 4.5.

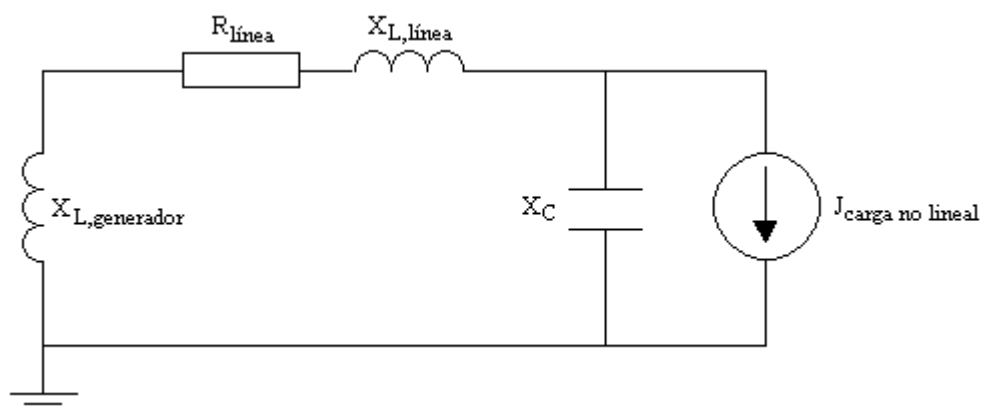


Figura 4.5. Esquema fase-neutro del sistema eléctrico de potencia para los armónicos en el que se ilustra un escenario de resonancia paralelo

La resonancia paralelo provoca que, a la frecuencia de resonancia (paralelo), la impedancia vista desde la carga no lineal (desde el PCC) sea muy elevada (tiende a infinito, ya que una inductancia y un condensador a la frecuencia de resonancia paralelo tienen la misma impedancia y, conectados en paralelo, equivalen a una impedancia infinita). Si la carga no lineal genera un armónico de corriente de frecuencia próxima a la de resonancia paralelo (suele suponerse que la carga no lineal, a frecuencias armónicas, se comporta como una fuente de corriente armónica constante), aparecerá una fuerte componente de tensión a la mencionada frecuencia en bornes del condensador (del filtro y no del condensador si dicho condensador forma parte de un filtro) y, por tanto, en bornes de la carga no lineal (en PCC).

La frecuencia a la que se producirá la resonancia paralelo, despreciando $R_{línea}$, se obtiene a partir de la expresión

$$f_{rp} = f \sqrt{\frac{X_C}{X_{L,generador} + X_{L,línea}}} \quad (Ec. 4.1)$$

donde f es la frecuencia de la tensión suministrada por el generador.

- Resonancia serie → Entre la inductancia del filtro (de haberlo) y el condensador del propio filtro, pues vistos desde la carga no lineal (desde el PCC) se hallan en serie, tal como se aprecia en la Figura 4.6.

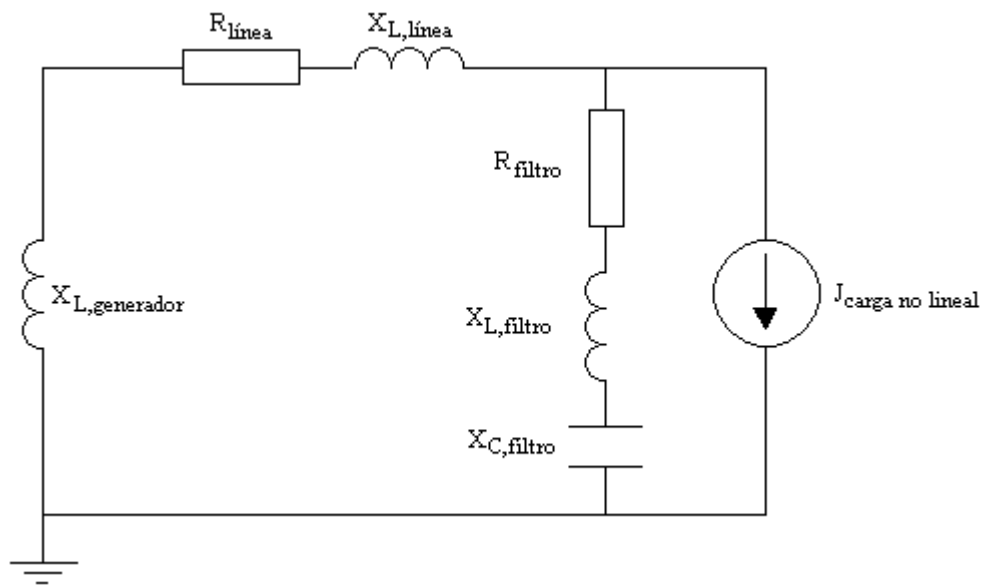


Figura 4.6. Esquema fase-neutro del sistema eléctrico de potencia para los armónicos en el que se ilustra un escenario de resonancia serie (y resonancia paralelo).

La resonancia serie provoca que, a la frecuencia de resonancia (serie), la impedancia vista desde la carga no lineal (desde el PCC) sea muy pequeña (tiende a cero, ya que una inductancia y un condensador a la frecuencia de resonancia serie tienen la misma impedancia y, conectados en serie, equivalen a una impedancia nula). Si la carga no lineal genera un armónico de corriente de frecuencia próxima a la de resonancia serie (suele suponerse que la carga no lineal, a frecuencias armónicas, se comporta como una fuente de corriente armónica constante), aparecerá una débil componente de tensión a la mencionada frecuencia en bornes del filtro y, por tanto, en bornes de la carga no lineal (en PCC).

La frecuencia a la que se producirá la resonancia serie, despreciando R_{filtro} , se obtiene a partir de la expresión:

$$f_{rs} = f \sqrt{\frac{X_{C,filtro}}{X_{L,filtro}}} \quad (Ec. 4.2)$$

donde f es la frecuencia de la tensión suministrada por el generador.

4.3. Efectos derivados de la presencia de armónicos

Los armónicos de corriente afectan al sistema de suministro eléctrico y a algunos tipos de cargas que a él se conectan. Si, además de los armónicos de corriente, aparecen los de tensión, se verán afectadas la mayoría de las cargas a él conectadas.

4.3.1. Efectos sobre los condensadores

La impedancia que presenta un condensador es inversamente proporcional a la frecuencia ($X_C = 1/(\omega \cdot C)$). Por eso la presencia de armónicos provoca que por el condensador circulen corrientes armónicas de valor apreciable. Como consecuencia los condensadores se calientan y acaban destruyéndose. Además, en caso de que se den resonancias, la tensión soportada por el condensador y la corriente que lo atraviesa pueden ser muy grandes, con resultados similares.

4.3.2. Efectos sobre los motores

Los armónicos de tensión provocan en los motores un aumento de las pérdidas en el hierro y en el cobre derivando en sobrecalentamientos, por lo que será necesario sobredimensionar dichos motores. Estas pérdidas conllevan además una reducción de sus vidas útiles.

Cada uno de los armónicos de tensión presentes en el sistema eléctrico de potencia tiende a hacer girar el motor a una velocidad diferente (la correspondiente a su frecuencia) pero, debido a que habitualmente la componente fundamental es mucho más grande que las componentes armónicas, la velocidad del motor finalmente será la que le correspondería si no hubiese armónicos presentes. Sin embargo, esa presencia sí que provocará en el motor la aparición de pares de giro parásitos que pueden dar lugar a oscilaciones, con el consiguiente desgaste mecánico.

4.3.3. Efectos sobre las medidas eléctricas

Del total de aparatos de medida del valor eficaz de tensiones o corrientes, sólo una parte de ellos son sensibles directamente a dicho valor. El resto son sensibles bien al valor medio rectificado (valor

medio del valor absoluto de una señal) o bien al valor de pico (valor máximo del valor absoluto de una señal): la lectura de valor eficaz que ofrecen la calculan a partir del valor a que son sensibles aplicando sobre él un determinado factor de escala (distinto en función del valor a que son sensibles), factor que sólo es válido cuando la tensión o corriente medida es sinusoidal. Así pues, cuando la tensión o corriente cuyo valor eficaz se quiera medir presente distorsión armónica, sólo los aparatos sensibles directamente al valor eficaz ofrecerán una lectura correcta.

Los aparatos que miden el factor de potencia basándose en el desfase tensión-corriente pueden dar resultados muy alejados de la realidad con ondas distorsionadas. El factor de potencia sólo se podrá obtener realizando el cociente entre el valor medio de la potencia instantánea (los wattímetros magnetoeléctricos lo miden) y el producto del valor eficaz de la tensión por el valor eficaz de la corriente.

Además, debe tenerse presente que los armónicos pueden saturar los transformadores de tensión, provocando errores de medida. Por lo que se refiere a los transformadores de corriente, aparece un decalaje entre las corrientes de primario y secundario que da lugar a un error en la medida de potencias.

En cuanto a los contadores de energía empleados en la facturación eléctrica, se han realizado estudios sobre ellos y los resultados obtenidos son contradictorios, pues se obtiene una lectura superior o inferior a la que corresponde dependiendo del tipo de contador y del espectro armónico de la carga no lineal.

4.3.4. Efectos sobre los equipos electrónicos

Los equipos que se basan en la frecuencia de la red pueden padecer problemas. Por ejemplo, los relojes basados en los pasos por cero de la tensión suelen verse inmersos en graves problemas de precisión cuando la distorsión armónica de la tensión es importante, llegándose a dar casos en los que dichos relojes avanzan a velocidad doble de la normal.

En los variadores de velocidad que recortan la onda (reguladores de fase y rectificadores controlados) pueden darse errores en la sincronización con los pasos por cero, llegando a ser destructivos en algunos casos (puede cebarse un tiristor cuando no corresponde).

Además, los armónicos de tensión pueden deformar las imágenes ofrecidas a través de los televisores y de las pantallas de ordenador.

4.3.5. Efectos sobre los cables

Los cables por los que circula corriente alterna se ven sometidos, debido al campo magnético creado por la propia corriente, a una disminución de su capacidad de transporte de la misma, pues ésta tiende a circular por la periferia de cada conductor y no por el centro. Este fenómeno se denomina efecto pelicular o efecto skin. Si además este conductor se halla cerca de otros conductores, la corriente circulará sólo por una zona de su periferia. Este otro fenómeno se denomina efecto de proximidad.

Estos dos fenómenos comportan una disminución de la sección efectiva del cable y, por tanto, un aumento de la resistencia efectiva del mismo. La importancia de los dos fenómenos y, por ende, de sus consecuencias es baja a frecuencias pequeñas y aumenta a medida que la frecuencia es mayor. Así pues, a mayor frecuencia (frecuencias armónicas), mayor es la resistencia efectiva que presenta el cable y, como se señaló en el subapartado 2.2.1, mayor es su reactancia (inductiva), colaborando ambos hechos en el aumento de la caída de tensión de la línea.

En cuanto al conductor neutro de un sistema trifásico (puede suponerse con tensiones equilibradas y simétricas) debe tenerse en cuenta que, cuando en el mencionado sistema trifásico las cargas están conectadas entre fase y neutro (que es la forma de conexión más habitual), las corrientes de las tres fases se suman en dicho neutro.

En un sistema trifásico como el descrito cuyas cargas sean todas lineales, si por las tres fases circulan corrientes sinusoidales, iguales en valor eficaz y desfasadas entre sí 120° (que es lo que sucede cuando el sistema trifásico está cargado equilibradamente), su suma en el neutro es nula. En cambio, de existir desequilibrios de carga, en el neutro se tiene una suma de corrientes no nula cuyo valor (para los desequilibrios de carga que se dan en la práctica) suele estar lejos del de la corriente que circula por cualquiera de las tres fases. Por este motivo se solían dimensionar los neutros con sección más pequeña (la mitad) que la de las fases.

Ahora bien, cuando de ese mismo sistema trifásico formen parte cargas no lineales, incluso ni estando cargado equilibradamente se tiene una suma de corrientes en el neutro nula. Los armónicos de corriente de orden múltiplo de 3 (armónicos de secuencia homopolar –en fase–) asociados a las tres fases se suman (orden de armónico a orden de armónico) en el neutro dando lugar a corrientes no nulas mayores que las de las fases, que en situaciones de carga desequilibrada son todavía más mayores por no ser nulas tampoco las sumas (orden de armónico a orden de armónico) en el neutro de los armónicos de corriente de secuencia directa y/o inversa. Esto se traduce en una sobrecarga del neutro dimensionado tal como antes se solía y ha conllevado que en la actualidad se recomiende dimensionar el neutro con una sección doble que la de las fases para el caso de carga equilibrada y

con una sección todavía mayor (o bien instalar un neutro diferente para cada fase) en caso de carga desequilibrada.

La sobrecarga del neutro, además de sobrecalentamiento y posible destrucción del mismo, puede originar tensiones neutro-tierra importantes que provoquen problemas en los equipos informáticos. Si el neutro tiene mucha reactancia (inductiva), puede suceder que la corriente tienda a circular por tierra en lugar de por el neutro.

Además, la circulación de corrientes armónicas por los cables instalados en bandejas o sobre falsos techos puede derivar en vibraciones que producen un ruido de frecuencia audible muy molesto.

4.3.6. Efectos sobre los grupos electrógenos

Estos elementos son fuentes de energía de emergencia, por lo que generalmente no pueden ser probados en condiciones de funcionamiento normal; entonces el día que son necesarios, aparecen los problemas de funcionamiento.

Los grupos electrógenos se caracterizan por tener una potencia de cortocircuito mucho más pequeña que la de la red o, dicho de otra forma, por tener una impedancia de salida mucho más grande que la de la red. Esta mayor impedancia provoca caídas de tensión más grandes que las habituales en la red y, por tanto, mayor distorsión de la tensión en bornes del grupo electrógeno caso de alimentar cargas no lineales. Además, esa elevada impedancia también comporta que la frecuencia de resonancia paralelo disminuya considerablemente (ver expresión (4.1)), por lo que se desaconseja completamente la compensación de potencia reactiva en la salida de estos equipos si las cargas alimentadas no van a ser todas lineales.

En la mayoría de los casos, cuando la red vuelve a estar operativa, el grupo electrógeno intenta sincronizarse con la red antes de transferir los consumos. Si la tensión en bornes del equipo presenta una distorsión muy alta, la sincronización automática se hace muy difícil, de forma que la transferencia automática de los consumos puede llegar a ser imposible.

4.4. Normativa que regula los niveles de armónicos

La distorsión armónica de la corriente por parte de las cargas no lineales junto con la consiguiente distorsión de la caída de tensión propiciada por las impedancias del sistema da lugar a perturbaciones armónicas en la alimentación, cuyo control es necesario para evitar daños en los equipos de la instalación. Ello ha conllevado la elaboración de toda una normativa que regula el nivel de armónicos tanto de tensión como de corriente.

Las normas reguladoras que hay en vigor, clasificadas en tres categorías, son las siguientes:

1. Normas sobre la compatibilidad entre los sistemas de distribución y los receptores.

Objeto: “Las perturbaciones armónicas causadas por un receptor en el sistema no deben exceder los límites establecidos y cada receptor debe poder funcionar normalmente en presencia de perturbaciones armónicas en el sistema que no excedan los límites establecidos.”

- IEC 1000-2-2 (EN 61000-2-2) para sistemas de distribución públicos de baja tensión.
- IEC 1000-2-4 (EN 61000-2-4) para instalaciones industriales de baja y media tensión.

2. Normas sobre la calidad en el suministro eléctrico por parte de los sistemas de distribución.

- EN 50160: Estipula las características de la tensión suministrada por los sistemas de distribución públicos de baja tensión.
- EEE 519 (Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia): Distribuidores y consumidores, desde sus respectivas parcelas, deben hacer frente común para no exceder los límites de distorsión armónica en el sistema de suministro eléctrico recomendados por la norma.

3. Normas sobre la distorsión armónica de la corriente por parte de los receptores.

Objeto: Establecer unos límites en la distorsión armónica de la corriente por parte de los receptores que aseguren los niveles de compatibilidad definidos en las normas clasificadas dentro de la categoría 1.

- IEC 1000-3-2 (EN 61000-3-2) para receptores que tengan una corriente de entrada por fase no superior a 16 A y que se vayan a conectar al sistema de distribución público de baja tensión.
- IEC 1000-3-4 (EN 61000-3-4) para receptores que tengan una corriente de entrada por fase superior a 16 A y que se vayan a conectar al sistema de distribución público de baja tensión.

Para hacerse una idea de los niveles de contenido armónico tolerados en estas normas, se ofrecen a continuación tabulados (Tablas 4.1, 4.2 y 4.3) algunos valores extraídos de ellas [3].

Distorsión armónica de tensión en el punto de conexión común (PCC)		
Tensión nominal del sistema [kV]	HD_{V_k} [%]	THD_V [%]
< 0.9	(*)	5.0
0.9 – 69	3.0	5.0
69 – 138	1.5	2.5
> 138	1.0	1.5

Tabla 4.1. Límites de distorsión armónica de tensión recomendados en la norma IEEE 519.

(*) Para baja tensión, los límites de distorsión armónica individual de tensión recomendados son función del orden del armónico:

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
k	HD_{V_k} [%]	k	HD_{V_k} [%]	k	HD_{V_k} [%]
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.3	6	0.5

Tabla 4.2. Límites de distorsión armónica individual de tensión para BT recomendados en la norma IEC 1000-2-2.

k	Clase A: Receptores trifásicos equilibrados y cualquier otro receptor que no sea de clase B, C o D.	Clase B: Receptores portátiles (no trifásicos).	Clase C: Receptores de iluminación (no trifásicos).	Clase D: Receptores tales que $75W < P < 600 W$ y una corriente de entrada con forma de onda "especial".
	$I_k [A]$	$I_k [A]$	$HD_{I_k} [\%]$	$I_k/P [mA/W]$
3	2.3	3.45	30·FP	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1
9	0.4	0.6	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	0.296
$15 \leq k \leq 39$ (k impar)	$2.25/k$	$3.375/k$	3	$3.85/k$
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-
6	0.3	0.45	-	-
$8 \leq k \leq 40$ (k par)	$1.84/k$	$2.76/k$	-	-

Tabla 4.3. Límites de componente armónica de corriente, de distorsión armónica individual de corriente o de razón componente armónica de corriente-potencia de entrada (según clase de receptor) recomendados en la norma IEC 1000-3-2.

4.5. Soluciones para mitigar los efectos armónicos

Evitar la *generación de armónicos es la principal solución para eludir sus efectos*. En el caso de armónicos causados por inductancias saturables, pueden evitarse dimensionando correctamente los transformadores de forma que su núcleo no se sature dentro del margen normal de tensiones; igual que hay en el mercado reactancias de fluorescente que no se saturan en funcionamiento normal.

Por lo que se refiere a las fuentes de alimentación (equipos electrónicos, lámparas de descarga con balasto electrónico), existen modelos en el mercado que, a base de sofisticar el circuito de control, se ha conseguido que consuman una corriente sinusoidal y en fase con la tensión (es decir, sin armónicos y sin reactiva). El problema es que estos equipos son más caros y a menudo no se aprecia la diferencia de precio hasta que no aparecen los problemas. Además, siempre se producen los problemas cuando el equipo está ya en funcionamiento y entonces se pretende darles solución sin cambiar el equipo.

De no poderse evitar la generación de armónicos, habitualmente se contemplan como soluciones para mitigar sus efectos las que se comentan a continuación.

4.5.1. Posicionar las cargas no lineales aguas arriba en el sistema eléctrico de potencia

Cuanto más aguas arriba en el sistema eléctrico de potencia se ubiquen las cargas no lineales, menos impedancia de cortocircuito del sistema de suministro eléctrico verán. Eso implica menor caída de tensión distorsionada y, por tanto, menor distorsión de la tensión en bornes de dichas cargas.

Así pues, consideraciones económicas aparte, conviene conectar las cargas distorsionantes tan aguas arriba en el sistema eléctrico de potencia como sea posible.

4.5.2. Agrupar las cargas no lineales, alimentando el grupo mediante una línea dedicada

El agrupamiento de las cargas no lineales que forman parte de un sistema eléctrico de potencia, alimentando el grupo resultante mediante una línea dedicada, tiene como objetivo propiciar los fenómenos de *cancelación armónica* y de *atenuación armónica* [4, 5] en la corriente total consumida por ese conjunto de cargas.

- *Cancelación armónica* → Disminución del valor eficaz del k-ésimo armónico de la corriente total consumida por el conjunto de cargas no lineales motivada por los desfases existentes entre los también k-ésimos armónicos de las corrientes consumidas por cada una de las cargas no lineales individualmente. Estos desfases se deben a la diversidad de fases de k-ésimo armónico de corriente propiciada por la distinta naturaleza o por el distinto valor de los parámetros característicos (en caso de idéntica naturaleza) de las cargas no lineales integrantes del conjunto.

Para cuantificar el nivel de cancelación armónica de orden k que se tiene en la corriente total consumida por el conjunto de cargas no lineales, se define **el factor de diversidad (diversity factor) de corrientes armónicas de orden k** como:

$$DF_{I_k} = \left| \sum_{i=1}^N \underline{I}_k^i \right| / \sum_{i=1}^N I_k^i \quad (Ec. 4.3)$$

donde $\underline{I}_k^i = I_k^i \angle \varphi_{I_k^i}$ es el fasor asociado a la corriente armónica de orden k consumida por la i -ésima carga (de N cargas no lineales) perteneciente al conjunto.

Este factor de diversidad puede tomar valores entre 0 y 1. Cuanto más pequeño es su valor, mayor es el nivel de cancelación armónica de orden k que se tiene.

- **Atenuación armónica** → Disminución del valor eficaz del k -ésimo armónico de la corriente total consumida por el conjunto de cargas no lineales motivada por el aumento de impedancia equivalente, vista desde el PCC, que supone una línea dedicada a dicho conjunto en lugar de una línea dedicada a cada una de ellas individualmente. Este aumento representa la mayor oposición que halla la corriente total de k -ésimo armónico que antes circulaba a través de N líneas cuando ahora debe hacerlo a través de una única línea (circulando menos corriente total de k -ésimo armónico en consecuencia), y debe propiciarse sobre todo en caso de idéntica naturaleza de las cargas no lineales integrantes del conjunto cuando además tienen idéntico valor de sus parámetros característicos.

Para cuantificar el nivel de atenuación armónica de orden k que se tiene en la corriente total consumida por el conjunto de cargas no lineales, se define el **factor de atenuación (attenuation factor) de corrientes armónicas de orden k** como:

$$AF_{I_k} = \frac{I_k^N}{N \cdot I_k^1} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

donde I_k^N es el valor eficaz de la corriente armónica de orden k consumida por las N cargas no lineales pertenecientes al conjunto y I_k^1 es lo mismo para $N = 1$.

Este factor de atenuación puede tomar valores entre 0 y 1. Cuanto más pequeño es su valor, mayor es el nivel de atenuación armónica de orden k que se tiene.

4.5.3. Alimentar las cargas no lineales a través de transformadores dedicados

En caso de que las cargas no lineales sean monofásicas, cuando se conecten al secundario de un transformador triángulo-estrella (correctamente dimensionado y protegido), desaparecerán los armónicos de secuencia homopolar en el sistema eléctrico de potencia aguas arriba del transformador. Esto es especialmente interesante en las instalaciones informáticas grandes donde, además, este transformador puede ser apantallado para proteger los equipos.

En las instalaciones de grandes convertidores donde hay más de una unidad, se suelen conectar los convertidores al secundario de transformadores empleando, para cada uno de ellos, índices horarios diferentes de forma que se compensen (total o parcialmente) algunos armónicos.

4.5.4. Instalar filtros

A los circuitos eléctricos cuya misión es impedir (o limitar) la presencia de armónicos de corriente en el sistema eléctrico de potencia se les denomina filtros. Estos **filtros**, en función de los elementos que los constituyen, pueden clasificarse en tres categorías: **pasivos, activos e híbridos** [6].

➤ **Filtros pasivos:**

Son aquellos constituidos exclusivamente por elementos pasivos, es decir, resistencias, inductancias y condensadores. Estos filtros pueden conectarse en serie o en paralelo con la/s carga/s no lineal/es, rechazando o absorbiendo respectivamente armónicos de corriente de determinadas frecuencias en particular (por cierto, establecidas de antemano –pobre respuesta dinámica ante cambios de contenido armónico en la corriente–).

La conexión en serie (*filtros pasivos serie*) es poco frecuente, ya que el hecho de que la componente fundamental de la corriente junto con la práctica totalidad de los armónicos tenga que pasar por el interior del filtro (sólo no pasarán los armónicos de frecuencias no toleradas, que son minoría) deriva en que los elementos componentes de dicho filtro sean grandes y caros. Además, este filtro debe ser aislado en todas sus partes (por la posible aparición de tensiones filtro-tierra elevadas) y sería consumidor de potencia reactiva a frecuencia fundamental (empeoramiento del factor de potencia).

En cambio, la conexión en paralelo (*filtros pasivos paralelo*) es mucho más habitual, dado que sólo los armónicos de corriente de frecuencias no toleradas tienen que pasar por el interior del filtro junto con parte de la componente fundamental y, en consecuencia, dicho filtro es más reducido y más económico que otro conectado en serie de igual efectividad. Además, este filtro puede ser “aterrizado” (dando lugar a tensiones filtro-tierra menores que conectado en serie) y sería suministrador de potencia reactiva a frecuencia fundamental (mejora del factor de potencia).

Filtros pasivos paralelo se instalan básicamente de dos tipos [3]:

- **Filtros de protección** → Esta solución consiste en conectar una inductancia (inductancia protectora o antiarmónicos) en serie con el equipo de compensación de potencia reactiva (batería de condensadores), dando lugar esta asociación a un filtro de protección o filtro de baja sintonización.

La finalidad de este tipo de filtros es presentar impedancia baja (resonancia serie) a una frecuencia inferior a la del armónico de corriente de orden más bajo existente en el sistema eléctrico de

potencia (habitualmente se sintoniza alrededor de los 200 Hz) e impedancias mucho más elevadas a frecuencias superiores, lográndose así de paso que la frecuencia de resonancia paralelo (inferior siempre a la frecuencia de resonancia serie) esté alejada de las frecuencias de los armónicos de corriente presentes en el sistema.

Con estos filtros se consigue una mitigación de los efectos sobre los condensadores señalados en el subapartado 2.3.1 y suele venir acompañada de una disminución de los armónicos de tensión existentes en el sistema eléctrico de potencia.

- *Filtros de absorción* → Este tipo de filtros, también denominados filtros sintonizados, se suele utilizar cuando la instalación de filtros de protección no supone una reducción suficiente de los armónicos de tensión presentes en el sistema eléctrico de potencia. Son equipos formados por varias ramas conectadas en paralelo, sintonizadas cada una de ellas a la frecuencia de un armónico de corriente distinto y siendo también cada una de ellas una asociación en serie de una resistencia, una inductancia y un condensador.

La finalidad de este tipo de filtros es que cada una de sus ramas presente impedancia baja (resonancia serie) a una frecuencia algo inferior (ligera desintonización) a la del armónico de corriente existente en el sistema eléctrico de potencia que a cada una le corresponda absorber (distinto para cada una de ellas) e impedancias más elevadas a frecuencias superiores, procurándose también de paso que la frecuencia de resonancia paralelo (inferior siempre a la frecuencia de resonancia serie) asociada a cada una de las ramas esté alejada de las frecuencias de los armónicos de corriente presentes en el sistema.

Esa ligera desintonización a la que se hace referencia en el párrafo anterior viene forzada por la gran proximidad entre los valores de las frecuencias de resonancia serie y paralelo en cada una de las ramas. De no haberse realizado, si se produce una eventualidad inesperada que provoque un aumento de la frecuencia de sintonización de cualquiera de las ramas del filtro, podría tenerse un escenario de resonancia paralelo a la frecuencia del armónico de corriente que a esa rama le correspondería absorber (justamente lo contrario de lo que se pretende).

➤ **Filtros activos:**

Son aquellos constituidos por elementos pasivos y transistores gobernados por circuitos de control que requieren fuente de alimentación. Estos filtros pueden conectarse en serie o en paralelo con la/s carga/s no lineal/es, siendo capaces en cualquier caso de neutralizar

prácticamente la totalidad de los armónicos de corriente (cuyas frecuencias, por cierto, no necesariamente están establecidas de antemano –buena respuesta dinámica ante cambios de contenido armónico en la corriente–), especialmente los de baja frecuencia.

Cuando se conectan en serie (filtros activos serie) actúan como fuentes de tensión controladas por corriente y, tras medir un ciclo de la corriente consumida por la/s carga/s no lineal/es, en el siguiente ciclo oponen muy alta impedancia a todos los armónicos de la corriente medida e impedancia prácticamente nula a la componente fundamental de dicha corriente.

Conectados en paralelo (filtros activos paralelo) actúan como fuentes de corriente controladas por corriente y, tras medir un ciclo de la corriente consumida por la/s carga/s no lineal/es, en el siguiente ciclo inyectan armónicos de corriente iguales pero opuestos a todos los armónicos de la corriente medida, quedando indemne la componente fundamental de dicha corriente.

Igual que sucede con los filtros pasivos, instalar filtros activos paralelo es lo más habitual.

➤ **Filtros híbridos:**

Son el resultado de combinar adecuadamente filtros pasivos con filtros activos, procurando que las ventajas de los primeros supongan la superación de los inconvenientes de los segundos y viceversa.

La combinación más típica es la de filtro activo serie junto con filtro pasivo paralelo de absorción:

- El filtro activo actuará como una impedancia en serie con la red, de forma que los armónicos de corriente circulen por el filtro pasivo y así se evita la aparición de una resonancia paralelo con la impedancia de la red (filtro pasivo desacoplado de la red). Además, será el encargado de neutralizar los armónicos de corriente de baja frecuencia, pues si esta tarea tuviera que llevarla a cabo el filtro pasivo sería necesario que sus componentes fueran más grandes y caros (especialmente su inductancia).
- En contrapartida, el filtro pasivo se encargará de eliminar los armónicos de corriente de alta frecuencia que el filtro activo no pueda neutralizar, además de los armónicos de corriente más importantes para lograr que el filtro activo maneje menor potencia por su peor rendimiento.

Examinadas las tres categorías de filtro conviene señalar que, aunque la utilización de filtros activos ha empezado a emerger en la actualidad como la técnica más efectiva en la mitigación de

armónicos de corriente, los ingenieros continúan prefiriendo emplear filtros pasivos por su robusto y simple diseño, su escaso mantenimiento y su comparativamente bajo coste.



5. Modelización del sistema

Los elementos integrantes de la red de distribución se deben modelizar correctamente para que los cálculos realizados por el programa sean lo más parecidos a la realidad posible. A continuación, detallamos los elementos a modelizar:

- Red de alimentación
- Líneas aéreas y cables
- Transformadores
- Consumos (Cargas lineales y no lineales)

De entre los elementos enumerados anteriormente serán considerados como elementos contaminantes las cargas no lineales y el resto de elementos serán considerados no contaminantes. En este apartado se presentará el modelo usado para cada elemento.

5.1. Red de alimentación

Se modelizarán con una fuente de voltaje y una reactancia conectadas en serie. La fuente de voltaje tendrá voltaje nulo para armónicos de orden superior al fundamental y la reactancia aumentará su valor de forma proporcional al orden k del armónico de forma que:

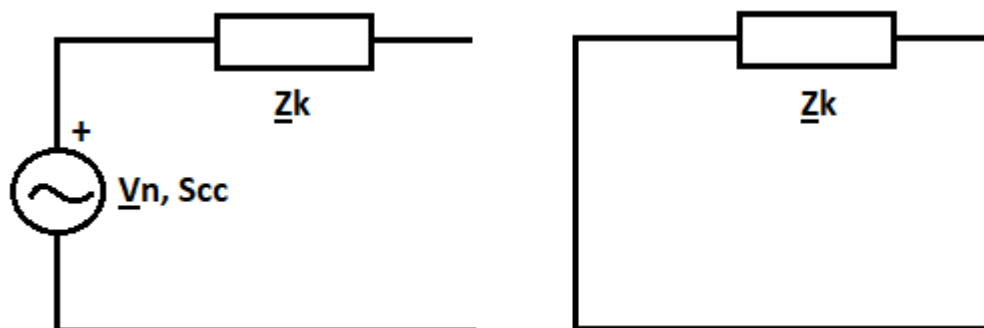


Fig. 5.1 y Fig. 5.2. Esquemas monofásicos de la red para la frecuencia fundamental (izquierda) y para los armónicos de orden superior (derecha). [Fuente: propia].

$$\underline{Z}_k = j \cdot k \cdot X_{cc1} \quad (Ec. 5.1)$$

$$X_{cc1} = \frac{V_n^2}{S_{cc}} \quad (Ec. 5.2)$$

Donde V_n es la tensión nominal de la fuente y S_{cc} es su potencia de cortocircuito.

Se tomará como origen de referencia de ángulos el fasor V_n . Así pues, el argumento del fasor V_n valdrá cero.

Su equivalente de Norton sería el siguiente:

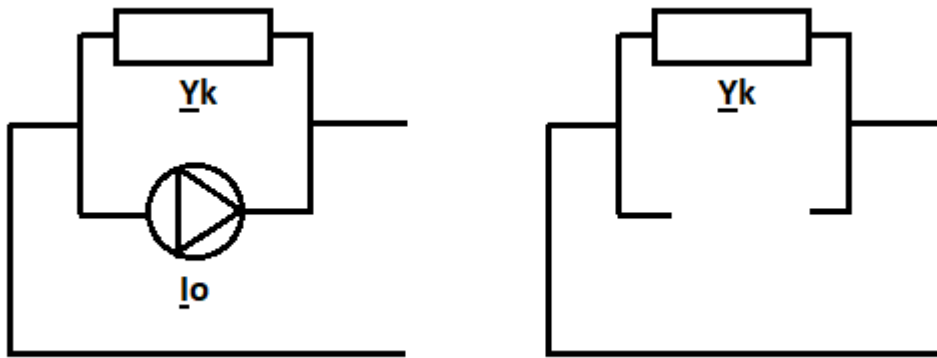


Fig. 5.3 y Fig. 5.4. Esquemas monofásicos de los equivalentes de Norton de la red para la frecuencia fundamental (izquierda) y para los armónicos de orden superior (derecha). [Fuente: propia].

$$\underline{I}_0 = \frac{V_n}{j \cdot X_{cc1}} \quad (Ec. 5.3)$$

$$\underline{Y}_k = \frac{1}{\underline{Z}_k} \quad (Ec. 5.4)$$

5.2. Líneas aéreas y cables

Las líneas se modelizarán con su esquema en π de parámetros concentrados con una conductancia nula para sus tramos transversales de forma que:

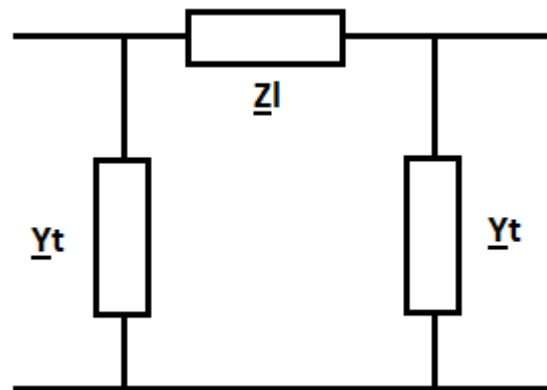


Fig. 5.5. Esquema monofásico en π de parámetros concentrados. [Fuente: propia].

$$\underline{Z}_L(k) = R + j \cdot k \cdot X_L = R + j \cdot k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (Ec. 5.5)$$

$$\underline{Y}_T(k) = j \cdot k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (Ec. 5.6)$$

Donde k es el orden del armónico correspondiente, f es la frecuencia en hercios (Hz) del armónico fundamental, L es la inductancia del cable en henrios (H) y C es la capacidad del cable en faradios (F) aunque en el programa la capacidad del cable será nula.

5.3. Transformadores

Los transformadores se modelizarán usando su impedancia equivalente de cortocircuito (Z_{cc}) afectada por el orden del armónico correspondiente.

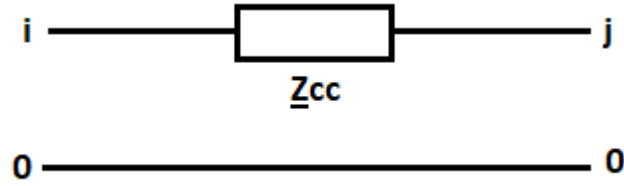


Fig. 5.6. Esquema monofásico del transformador. [Fuente: propia].

Debido a que los transformadores de tipo triángulo-estrella y estrella-triángulo impiden el paso de los armónicos de orden múltiplo de 3, para estos armónicos su modelo cambiará a:

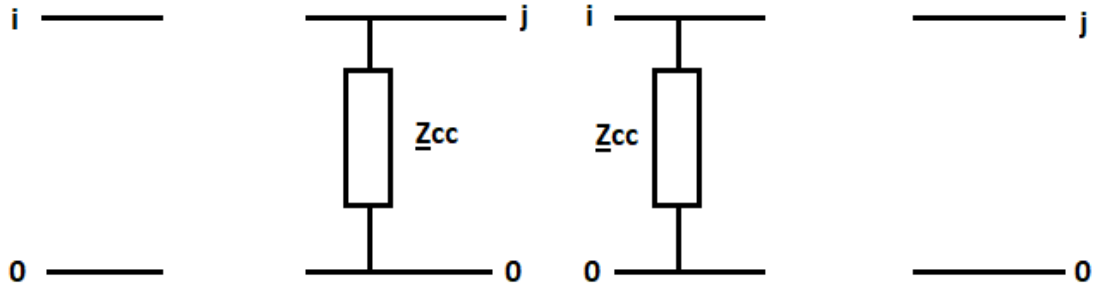


Fig. 5.7 y Fig. 5.8. Esquema monofásico del transformador triángulo-estrella (izquierda) y estrella-triángulo (derecha) para armónicos de orden múltiplo de tres. [Fuente: propia].

$$X_{cc} = \frac{\varepsilon_{cc}(\%) }{100} \cdot \left(\frac{V_{secN}}{V_{secB}} \right)^2 \cdot \frac{S_B}{S_N} = \frac{\varepsilon_{cc}(\%) }{100} \cdot \left(\frac{V_{priN}}{V_{priB}} \right)^2 \cdot \frac{S_B}{S_N} \quad (Ec. 5.7)$$

$$R_{cc} = \frac{1}{20} \cdot X_{cc} \quad (Ec. 5.8)$$

$$\underline{Z}_{cc} = R_{cc} + j \cdot k \cdot X_{cc} \quad (Ec. 5.9)$$

Donde k es el orden del armónico correspondiente, ε_{cc} es la tensión de cortocircuito, V_{secN} es la tensión nominal del secundario, V_{secB} es la tensión base del secundario, V_{priN} es la tensión nominal

del primario, V_{priB} es la tensión base del primario, S_N es la potencia nominal del transformador y S_B es la potencia base.

5.4. Consumos

Se modelizará un consumo como una carga lineal situada en paralelo con una carga agregada no lineal, representada como una fuente de corriente y una batería de condensadores.

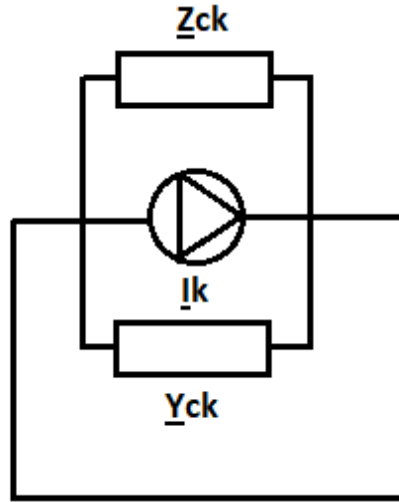


Fig. 5.9. Esquema monofásico del consumidor. [Fuente: propia].

5.4.1. Carga lineal

La carga lineal se modelizará como una impedancia (Z_c) soportando un voltaje de 400V (tensión de línea) y usando los valores de potencia activa trifásica (P) y factor de potencia (FP) definidos para el consumo de forma que:

$$\underline{S}_c = P_c + j \cdot \frac{P_c}{FP} \cdot \sin(\cos^{-1}(FP)) \quad (Ec. 5.10)$$

$$\underline{Z}_c = \frac{400^2}{S_c^*} = R_c + j \cdot X_c \quad (Ec. 5.11) \quad \underline{Z}_c(k) = R_c + j \cdot k \cdot X_c \quad (Ec. 5.12)$$

5.4.2. Carga agregada no lineal

La carga agregada no lineal se modelizará como fuente de corriente con contenido armónico.

Como la base de datos PANDA proporciona (tal como se comentará en el capítulo 7 de esta memoria) la amplitud (A) y la fase (θ) de cada armónico (k) de intensidad consumida por cada una de las cargas no lineales integrantes de la carga agregada, es posible calcular (según se indicará en el capítulo 8 de

esta memoria) la amplitud (A) y la fase (θ) de cada armónico (k) de intensidad consumida por la carga agregada no lineal. Entonces, la intensidad de orden k (I_k) consumida por dicha carga agregada puede expresarse como sigue:

$$I_k = A_k \cdot (\cos(\theta_k) + j \cdot \sin(\theta_k)) \quad (Ec. 5.13)$$

5.4.3. Batería de condensadores

La batería de condensadores se modelizará como muestra la siguiente expresión, donde k es el armónico, f es la frecuencia y C la capacitancia:

$$\underline{Y}_c(k) = j \cdot k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (Ec. 5.14)$$

5.5. Reducciones y PU

Para realizar el cálculo será necesario reducir todos los valores (tensiones, corrientes e impedancias) a una base de trabajo común. Si se da el siguiente esquema:

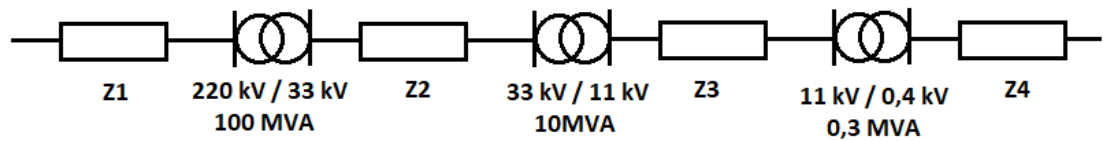


Fig. 5.10. Transformadores e impedancias en serie. [Fuente: propia].

Se escogerán como tensiones base:

$$V_{b1} = 220 \text{ kV} \quad V_{b2-4} = 33 \text{ kV} \quad V_{b5-10} = 11 \text{ kV} \quad V_{b11-26} = 0,4 \text{ kV}$$

De esta forma, los valores reducidos a PU de los elementos colocados entre los transformadores se calcularán como:

$$v_i = \frac{V_i}{V_{bi}} \quad (Ec. 5.15) \quad i_i = \frac{I_i}{I_{bi}} \quad (Ec. 5.16) \quad z_i = \frac{Z_i}{Z_{bi}} \quad (Ec. 5.17)$$

Para todos los subíndices y siendo que:

$$I_{bi} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_{bi}} \quad (Ec. 5.18) \quad Z_{bi} = \frac{V_{bi}^2}{S_b} \quad (Ec. 5.19)$$

En el caso de los transformadores las formulas detalladas en el apartado 5.3 siguen siendo válidas ya que están expresadas de forma que el resultado salga directamente en PU.

Una vez realizado el cálculo, para obtener el valor real, hará falta deshacer la reducción usando los valores base escogidos anteriormente.

6. Método de cálculo

Tal como se ha comentado, en los últimos años ha crecido el interés por la obtención de las tensiones de la red a las frecuencias fundamental y armónicas debido al aumento en el número de cargas contaminantes conectadas al sistema. Esto ha hecho que se reformule el flujo de cargas tradicional para incorporar las tensiones armónicas y los parámetros que definen el comportamiento de cada consumo no lineal tal como se explica en el apartado 3.

Las técnicas para el análisis del flujo armónico de cargas se clasifican en dos grupos:

- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia

Las que pertenecen al primer grupo se basan en la resolución de las ecuaciones diferenciales del sistema mediante integración numérica, lo que implica un esfuerzo en el cálculo muy grande.

Las del segundo grupo extienden la formulación tradicional del flujo de cargas incluyendo el tratamiento de los dispositivos no lineales y las tensiones armónicas.

Debido a la complejidad del problema por la posibilidad de la aparición de asimetrías en el sistema por la transposición de las líneas de transmisión y las cargas junto al complejo comportamiento de los consumos no lineales ha llevado a considerar los desequilibrios de la red para formular un flujo de cargas más realista.

En este tipo de formulaciones se dejan los consumos de las cargas no lineales como incógnitas en función de la tensión. Debido a esto, los métodos de resolución usados se basan en suponer un valor inicial para los contenidos armónicos que inyectan los dispositivos e ir modificando estos valores iterativamente hasta que las ecuaciones recursivas del método llegan a una solución. Como otros métodos iterativos, sistema de ecuaciones puede tener diferentes soluciones y la solución obtenida puede depender del punto de partida escogido. Entonces, para encontrar la solución del caso estudiado será necesario realizar ciertas metodologías a parte del cálculo iterativo.

La formulación más simple del flujo armónico de cargas corresponde a la penetración armónica. Se toma la hipótesis de que los dispositivos no lineales no tienen un comportamiento distinto por el hecho de soportar tensiones con contenido armónico y por consiguiente la potencia en un nudo del sistema queda definida únicamente por la tensión y la intensidad fundamentales de ese nudo.

Una vez esclarecido el sistema con los dispositivos lineales y no lineales, las tensiones armónicas pueden ser calculadas mediante el método de los nudos a partir de la matriz de admitancias que

caracteriza el conjunto red-cargas pasivas y de la inyección de las intensidades armónicas de los dispositivos no lineales.

Esta formulación permite abordar el problema armónico de manera sencilla pero el hecho de no considerar la sensibilidad de los consumos a las tensiones armónicas genera una sobreestimación de la contaminación armónica de la red. Por este hecho se recomienda aplicar la formulación cuando se prevea que la distorsión armónica será reducida.

En este trabajo se utilizarán los datos de la base de PANDA para caracterizar el comportamiento armónico de los dispositivos no lineales y, por lo tanto, no será necesario plantear ninguna ecuación para este cometido.

6.1. Penetración armónica

El método de la penetración armónica consiste en resolver la red bajo la hipótesis de que los dispositivos no lineales no cambian su comportamiento al estar bajo tensiones con contenido armónico y tampoco interactúan entre ellos.

Se caracterizará el sistema y se resolverán sus ecuaciones para cada orden armónico. Es decir, se estudiará la red para la componente fundamental y para 9 órdenes de armónico lo que comportará estudiar 10 redes con la misma distribución, pero con las impedancias y corrientes correspondientes a la componente fundamental o armónica tratada.

6.1.1. Nodos del sistema

El método requiere definir ciertos puntos (nodos) sobre el esquema del sistema que se identificarán usando números. En concreto:

- Requiere un nodo 0 de referencia que se tomará allí donde se encuentre la tensión más baja del sistema.
- Un nudo por cada embarrado o unión de dos o más ramificaciones.
- Dos nudos por cada fuente de corriente o de tensión, un nudo en cada extremo.
- Dos nudos por cada impedancia que presente acoplamiento magnético, uno en cada extremo.

Teniendo en cuenta todo lo nombrado en este punto el sistema queda de la manera siguiente:

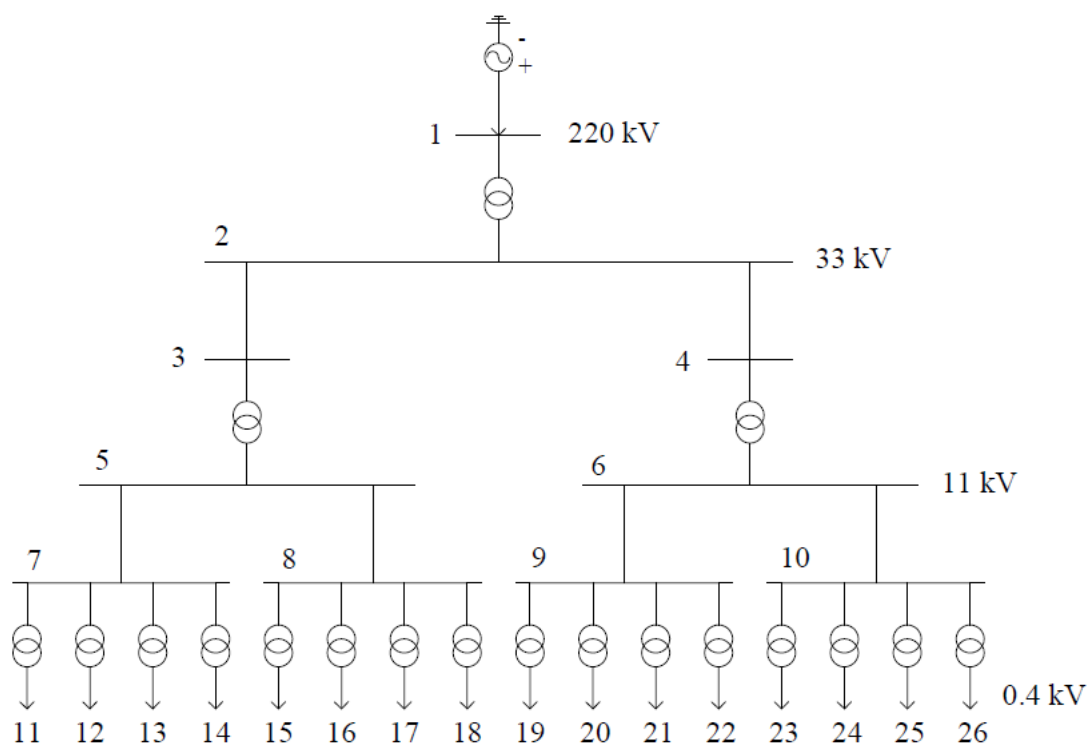


Fig. 6.1. Esquema fase-neutro del sistema con sus nodos numerados. [Fuente: propia].

El orden seguido para la numeración ha sido el mismo que el orden de escritura: de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

Para los nodos terminales, representados por los iconos de flecha hacia abajo, se tomarían de la forma mostrada por la imagen inferior de manera que, para cada embarrado desde el numero 11 hasta el 26 se conectará 1 consumo:

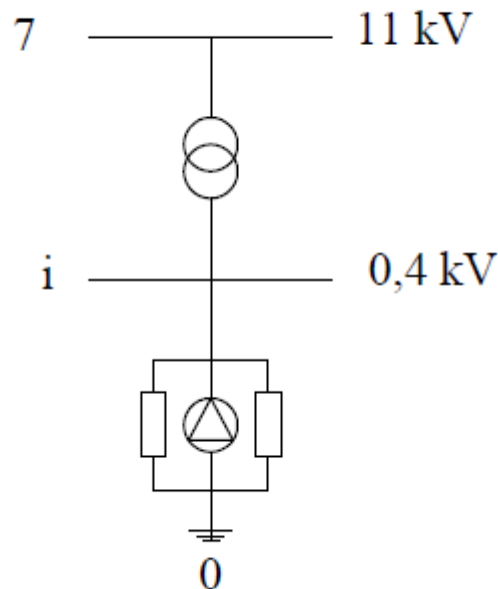


Fig. 6.2. Esquema fase-neutro de uno de los últimos embarrados. [Fuente: propia].

Siendo i los buses desde el 11 hasta el 26.

6.1.2. Construcción de la matriz de admitancias \underline{Y}

La matriz de admitancias (\underline{Y}) es una matriz cuadrada y simétrica de dimensión igual al número de nodos del sistema, sin contar el nodo 0.

Para construirla es muy importante tener en cuenta la numeración de los nodos de cada elemento, el valor y posición de las admitancias con las que se modela el elemento para el armónico tratado.

Los elementos de la diagonal de la matriz se obtendrán mediante la suma de todas aquellas admitancias que tengan uno de sus extremos conectados al nodo i .

Los elementos que no sean de la diagonal se obtendrán cambiando de signo la suma de las admitancias que tengan sus extremos conectados a los nodos i y j simultáneamente.

La formulación es la siguiente, siendo N el número de nodos del sistema y M el número de admitancias conectadas a la vez en los nodos i y j :

$$\underline{Y}_{i,i} = \sum_{j=1}^N (\underline{y}_{i,j} + \underline{y}_{j,i}) \quad (Ec. 6.1)$$

$$\underline{Y}_{i,j} = \underline{Y}_{j,i} = (-1) \cdot \sum_{a=1}^M \underline{y}_{i,j,a} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Los valores de admitancias utilizados se calcularán como el inverso de la impedancia reducida:

$$\underline{y} = \underline{z}^{-1} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

6.1.3. Construcción del vector de intensidades inyectadas (\underline{I})

El vector de intensidades inyectadas (\underline{I}) se construirá a partir de la intensidad inyectada por la red de alimentación de las intensidades inyectadas por las cargas no lineales. En lo que respecta a las cargas agregadas, las intensidades inyectadas por las mismas a la red de distribución se obtienen cambiando el signo de las intensidades que consumen.

Para la componente fundamental, la intensidad inyectada por la red de alimentación será diferente de cero, pero para los armónicos, dicha intensidad será nula. Por tanto, los únicos elementos que podrán presentar intensidades inyectadas no nulas para los armónicos serán las cargas agregadas no lineales.

Igual que con la matriz de admitancias, para cada armónico se construirá un vector de intensidades inyectadas distinto usando valores de intensidades inyectadas reducidos.

6.1.4. Resolución

El sistema de ecuaciones del sistema viene determinado mediante la expresión:

$$\underline{Y} \cdot \underline{V} = \underline{I} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Aislado el vector de tensiones se tiene que éste es igual al producto de la matriz de admitancias invertida y el vector de intensidades:

$$\underline{U} = \underline{Y}^{-1} \cdot \underline{I} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Será necesario resolver este producto tantas veces como armónicos se hayan considerado. Las tensiones obtenidas estarán expresadas en PU.

En caso de querer expresarlas como valores sin reducir, se deberá multiplicar cada valor por la tensión base correspondiente a cada nodo.

Si se quiere conocer la intensidad que circula por una impedancia será necesario dividir la diferencia de potencial de los terminales de la impedancia entre el valor de ésta, de manera que:

$$\underline{I}_{i,j} = \frac{\underline{V}_j - \underline{V}_i}{\underline{Z}_{i,j}} \quad (Ec. 6.6)$$

Aplicando la formula descrita se obtendrán valores de intensidad reducido siempre y cuando los valores de V y Z sean valores reducidos. En caso de no ser valores reducidos a PU, los valores obtenidos serán de intensidad no reducido, es decir, serán los valores reales.

7. equipMent hArmoNic Database (PANDA)

El proyecto de PANDA nace en la universidad técnica de Dresden, en Alemania con la voluntad de crear una plataforma de ámbito global en la que diferentes laboratorios puedan intercambiar los registros de emisión armónica de diferentes dispositivos domésticos.

Pretende ser una ayuda para aquellos investigadores cuyos estudios necesiten conocer el contenido armónico de ciertos dispositivos. Así, los investigadores no se verían obligados a invertir tiempo en registrar la emisión armónica de sus dispositivos, sino que se les ofrecen los datos ya registrados de los dispositivos que necesitan, almacenados mediante los estándares de PANDA.

El 29 de enero de 2016 la base de PANDA constaba de 4490 registros y ha seguido creciendo desde entonces. Para acceder a estos registros se debe estar registrado como laboratorio colaborador y entrar mediante su página web. Desde ésta se pueden consultar los diferentes archivos de la base de datos o bajarlos como un archivo de texto.

- Para bajar uno o varios archivos es necesario pulsar el enlace “Download” de la parte izquierda de la pantalla. Después el visitante puede bajar los archivos uno a uno pulsando en el icono de disquete correspondiente de la parte derecha de la pantalla o puede seleccionar varios archivos y pulsar el botón “download” situado debajo de la lista de archivos. Encima de la lista de archivos se encuentran diferentes opciones de búsqueda por si el visitante está interesado en los registros de un dispositivo con características concretas.

TP-ID	Description	Category	Subcategory	Power	Supply	Year	Country	Lab
3072	CFL 15W NO DIMMABLE (COH-001 SUP.L1- 1.6 MSample/s)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	2	2010	CH	IEEH
3073	CFL 15W NO DIMMABLE (COH-001 SUP.L1- 0.1 MSample/s)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	2	2010	CH	IEEH
3074	CFL 15W NO DIMMABLE (COH-001 SUP.L2)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	2	2010	CH	IEEH
3078	CFL 15W NO DIMMABLE (COH-001 SUP.L7)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	3	2010	CH	IEEH
3453	LED 7W DIMMABLE (LGB-003 SUP.L1- 1.6 MSample/s)	Lighting	Integrated solid state lamp	7	2	2011	GB	IEEH
4206	DESKTOP DC SOURCE MEASURED WITH A DC LOAD OF 150W RATED POWER 520V (NDE-006 SUP.L1- 1.6 MSample/s)	Computer and Communication	Desktop	520	2	2009	DE	IEEH
3824	Smartphone Measurement when the battery was discharged (NDE-006 SUP.L1- 1.6 MSample/s)	Computer and Communication	Mobile devices	NA	2	2009	DE	IEEH
3877	Charging with max. current (16 A)	Electric Vehicles	Electric car with onboard rectifier	3600	2	2013	DE	IEEH
3878	Charging with max. current (16 A) flat-top waveform	Electric Vehicles	Electric car with onboard rectifier	3600	3	2013	DE	IEEH
3879	Charging with max. current (16 A) pointed-top waveform	Electric Vehicles	Electric car with onboard rectifier	3600	3	2013	DE	IEEH

Fig. 7.1. Catálogo de dispositivos para descargar.

- Para consultar los datos de un dispositivo es necesario pulsar sobre el enlace “view” de la parte izquierda de la pantalla. Se cargará una pantalla similar a la vista anteriormente pero en este caso si se pulsa sobre algún identificador (ID) de los de la lista la ventana del explorador mostrará las formas de onda y los espectros armónicos del dispositivo y diferentes datos de éste.

Category	Lighting
SubCategory	Integrated Solid State Lamp
Description	LED 7W DIMMABLE (LGB-003 SUPL:1- 1.6 MSamples/s)
Sell Year	2011
Sell Country	GB
Rated power	7 W
Nominal voltage	230 V
Nominal frequency	50 Hz
Supply Type	Programmable generator/Sinusoidal voltage waveform

All following parameters (except of crest factor and maxima) are calculated from the spectra.

Voltage parameters

Voltage RMS	229.77 V
Voltage crest factor	1.4160
Voltage total harmonic distortion	0.18 %
Voltage peak maximum	325.39 V

Current parameters

Current RMS	41.86 mA
Current crest factor	2.3251
Current total harmonic distortion	75.02 %
Current peak maximum	96.86 mA

Power parameters

Apparent power (S)	9.62 VA
Active Power (P)	6.47 W
Reactive Power (Q)	7.11 var
Apparent fundamental power (S1)	7.69 VA
Active fundamental Power (P1)	6.47 W
Reactive fundamental Power (Q1)	-4.16 var
Harmonic distortion power (D)	10.00 mvar
Power factor	0.6729
Displacement factor	0.8409

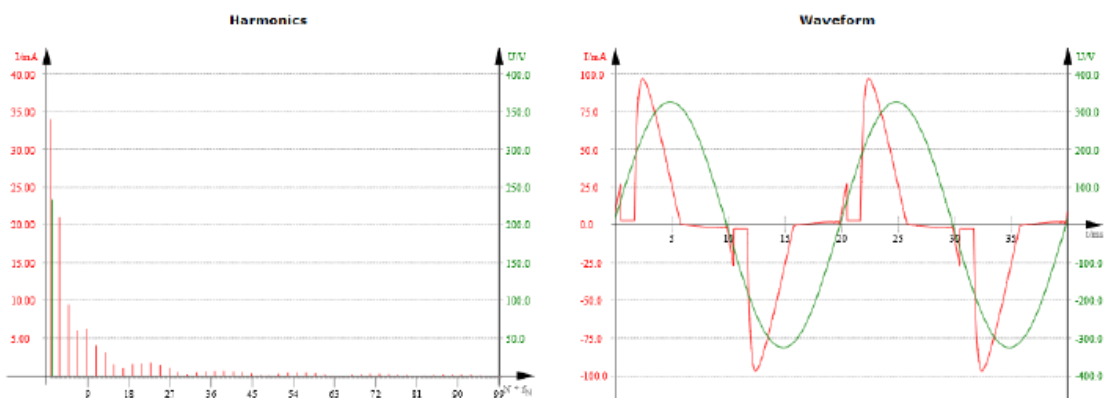


Fig. 7.2. Datos de un dispositivo.

8. Construcción de la carga agregada no lineal

8.1. Cargas no lineales integrantes de la carga agregada

Se han escogido de la base de datos PANDA los registros de corriente consumida por tres cargas no lineales típicas en una red de distribución: una lámpara fluorescente compacta (CFL), una lámpara de diodo emisor de luz (LED) y un ordenador personal (PC). Los archivos con los registros de corriente consumida por cada una de las cargas no lineales consideradas, CFL_I.txt, LED_I.txt y PC_I.txt respectivamente, se pueden consultar en el anexo a esta memoria. El formato de la información que contienen dichos archivos es el siguiente:

Orden de armónico 1, Valor eficaz de la corriente armónica de orden 1, Ángulo de fase de la corriente armónica de orden 1, Orden de armónico 2, Valor eficaz de la corriente armónica de orden 2, Ángulo de fase de la corriente armónica de orden 2, ... , Orden de armónico 49, Valor eficaz de la corriente armónica de orden 49, Ángulo de fase de la corriente armónica de orden 49

Seguidamente se muestran las formas de onda de la corriente consumida por cada una de las tres cargas no lineales consideradas, así como los espectros completo y armónico asociados a esas formas de onda, todo lo cual obtenido a partir del tratamiento numérico mediante MATLAB de los archivos CFL_I.txt, LED_I.txt y PC_I.txt procedentes de PANDA.

8.1.1. Lámpara fluorescente compacta (CFL)

Forma de onda de la intensidad consumida:

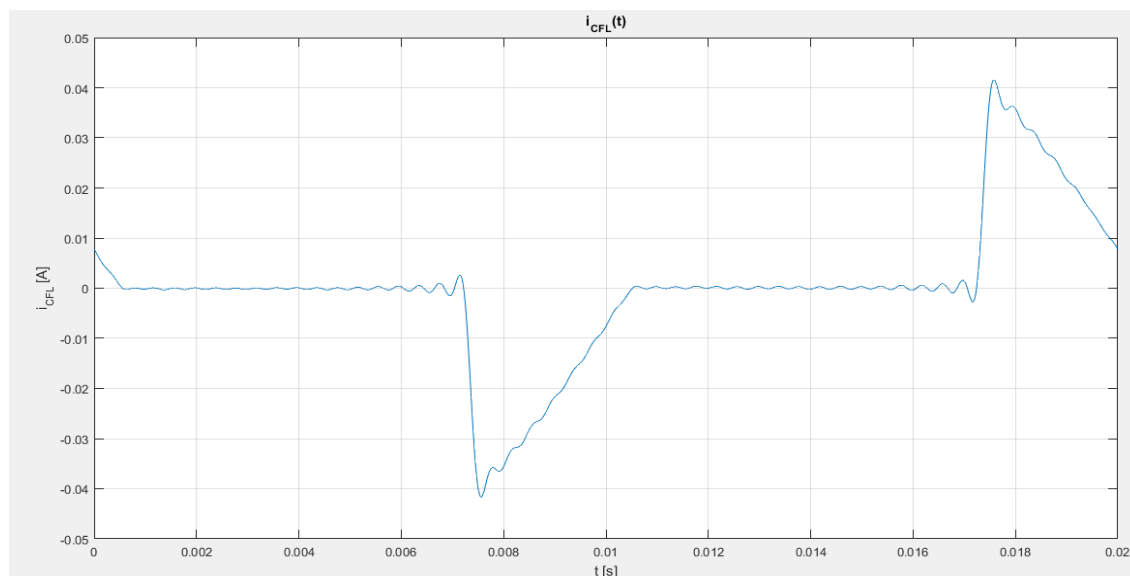


Figura 8.1. Forma de onda de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro completo de la intensidad consumida:

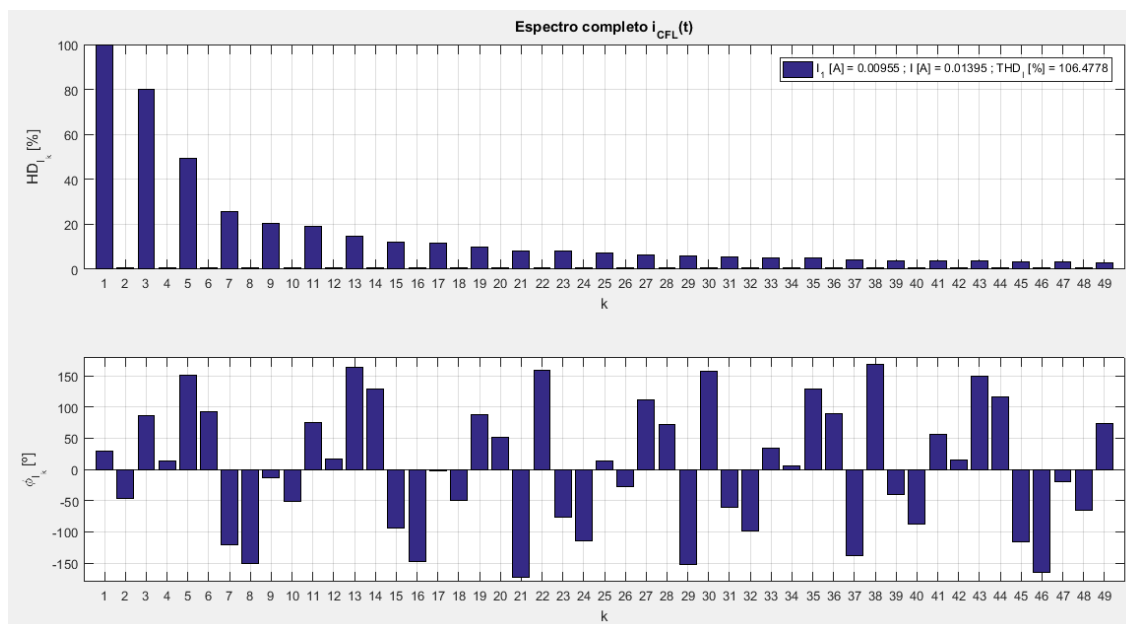


Figura. 8.2. Espectro completo de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro armónico de la intensidad consumida:

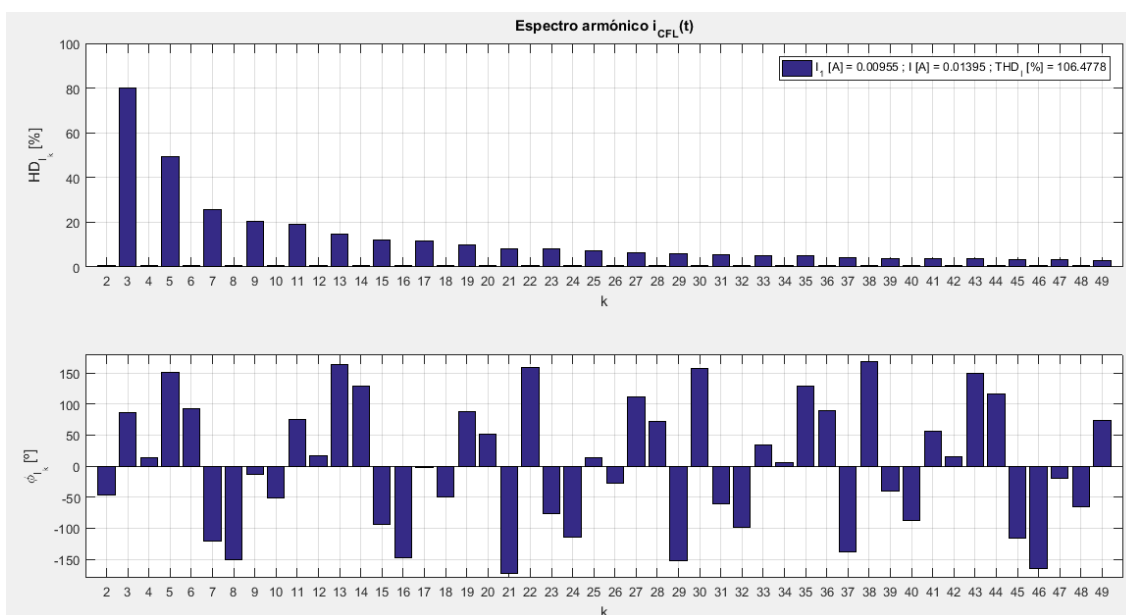


Figura. 8.3. Espectro armónico de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Puede observarse que la corriente consumida presenta un THD bastante elevado, a pesar de su reducido valor eficaz.

8.1.2. Lámpara de diodo emisor de luz (LED)

Forma de onda de la intensidad consumida:

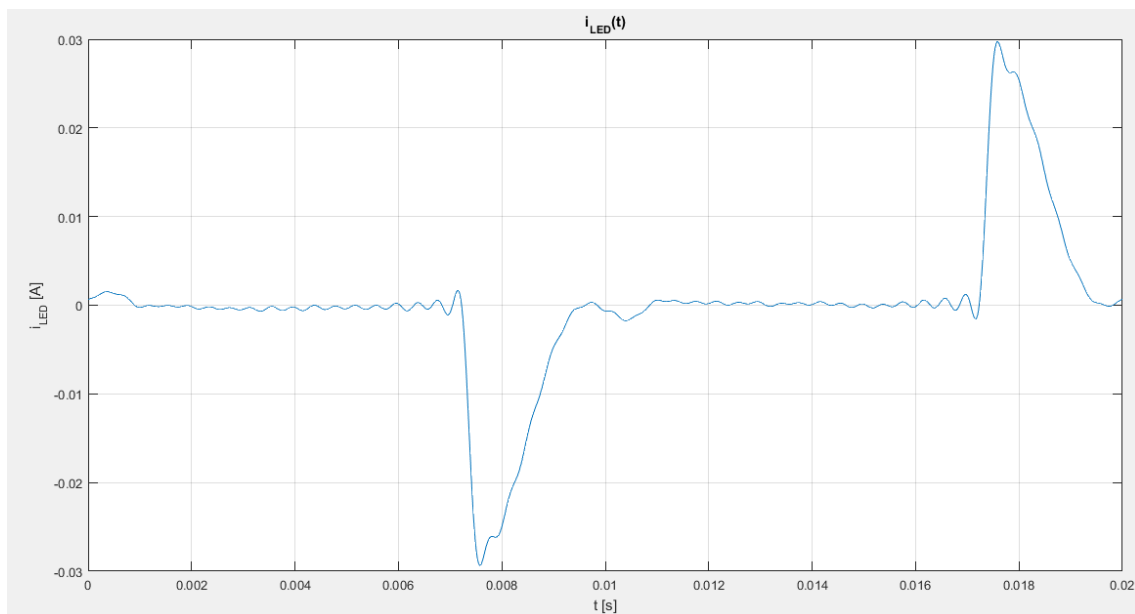


Figura. 8.4. Forma de onda de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro completo de la intensidad consumida:

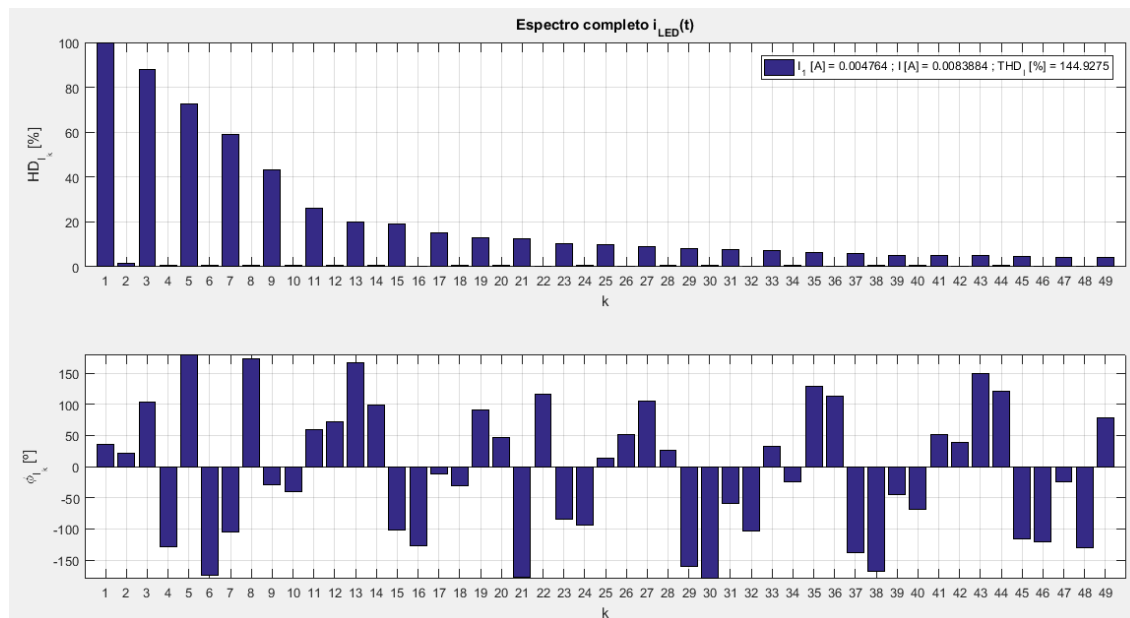


Figura. 8.5. Espectro completo de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro armónico de la intensidad consumida:

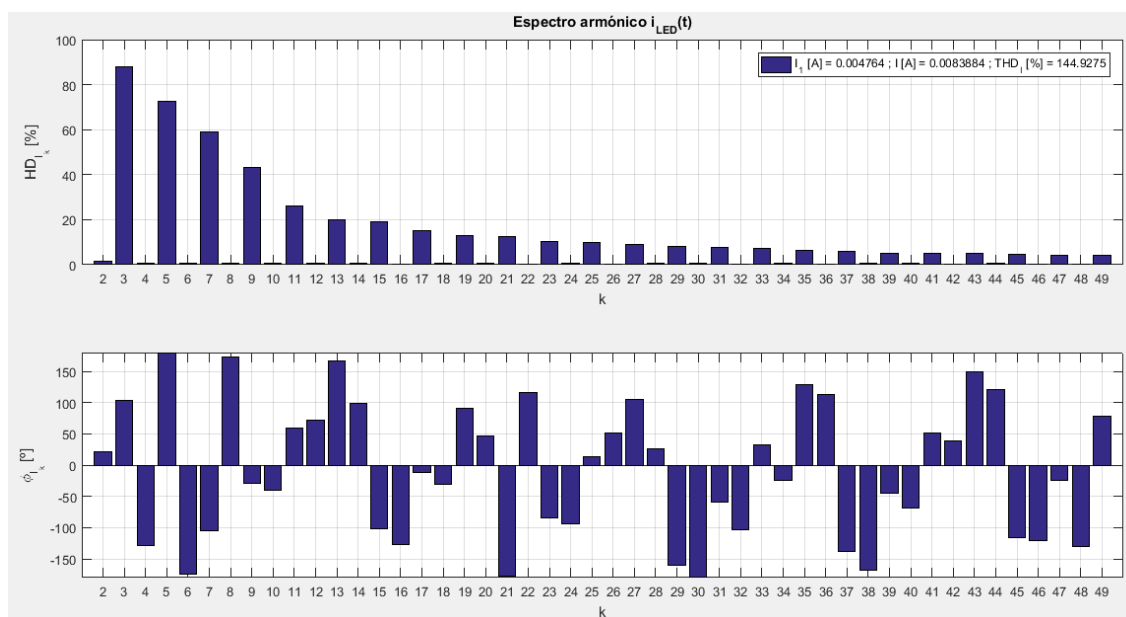


Figura. 8.6. Espectro armónico de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Se detecta que la corriente consumida presenta un THD más elevado que el de la anterior carga no lineal, a pesar de su menor valor eficaz.

8.1.3. Ordenador personal (PC)

Forma de onda de la intensidad consumida:

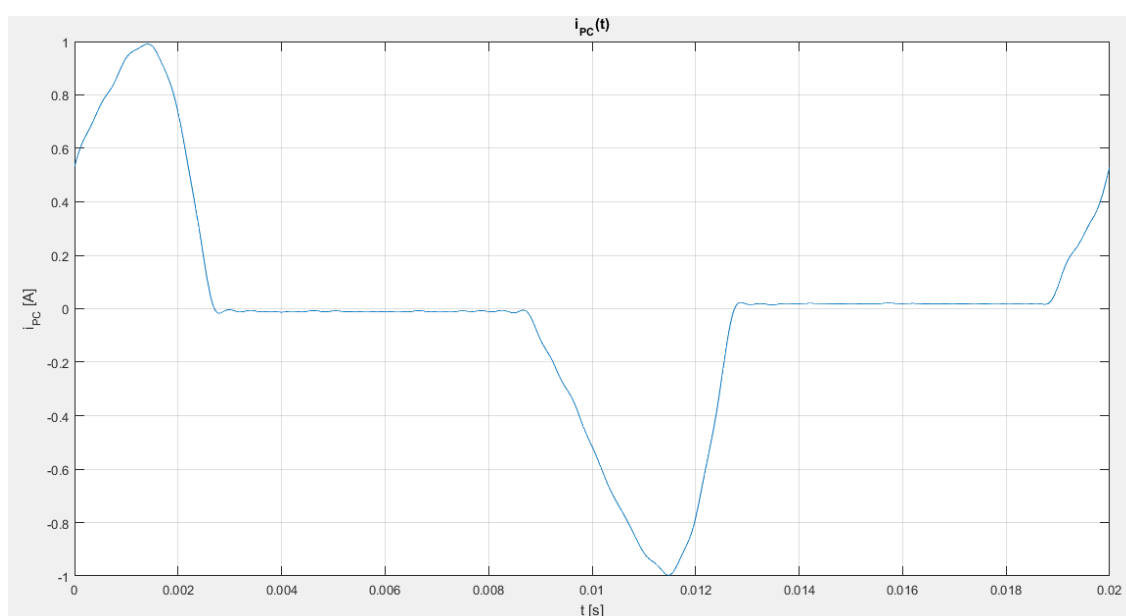


Figura. 8.7. Forma de onda de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro completo de la intensidad consumida:

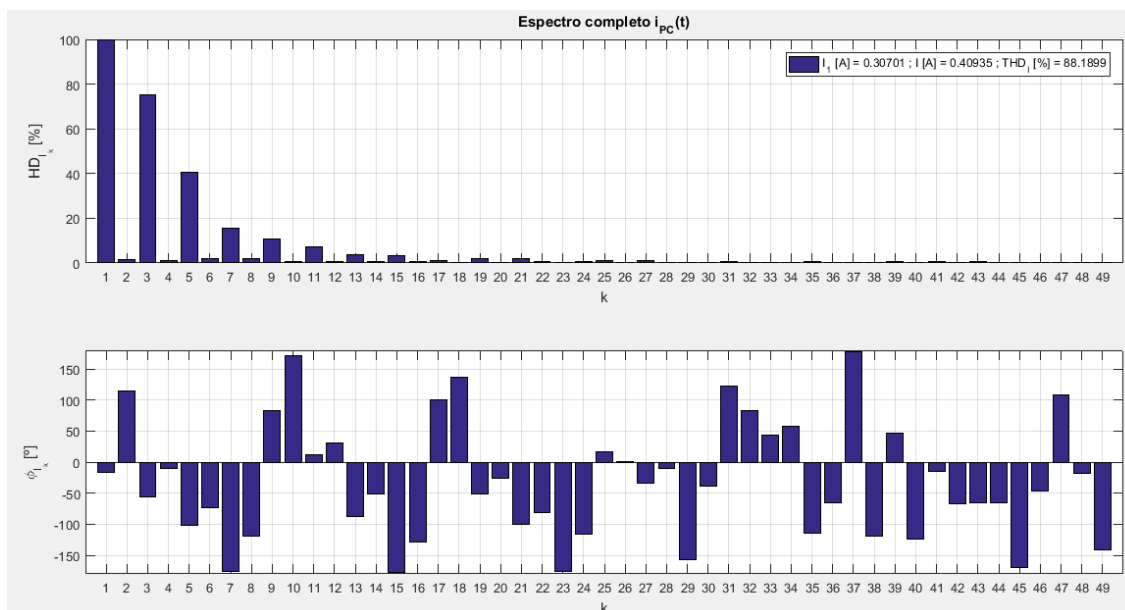


Figura. 8.8. Espectro completo de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro armónico de la intensidad consumida:

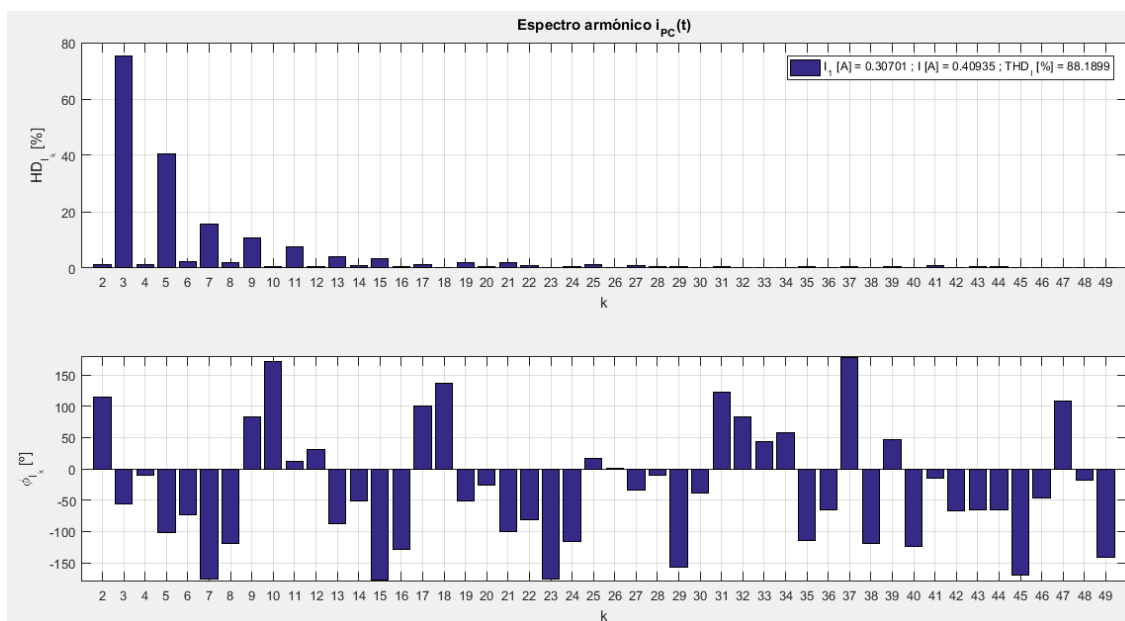


Figura. 8.9. Espectro armónico de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Queda claro que la corriente consumida presenta el THD más reducido de las tres cargas no lineales consideradas, a pesar de tener el mayor valor eficaz.

8.2. Carga agregada no lineal resultante

Cuando un grupo de cargas no lineales de distinta naturaleza se conectan a un mismo bus o punto de conexión común (PCC), es posible lograr que el bloque formado por ese grupo de cargas consuma una corriente total con un THD inferior al de las corrientes consumidas individualmente por cada una de las cargas no lineales integrantes del grupo. Este grupo de cargas no lineales forman lo que se conoce como carga agregada no lineal. La intensidad total de orden k (I_k) consumida por dicha carga agregada, si sólo está integrada por cargas no lineales de los tres tipos considerados en este trabajo (CFL, LED y PC), puede calcularse como sigue:

$$\underline{I}_k = n_{CFL} \cdot \underline{I}_{k,CFL} + n_{LED} \cdot \underline{I}_{k,LED} + n_{PC} \cdot \underline{I}_{k,PC} \quad (Ec. 8.1)$$

En la expresión anterior, se tiene que:

$$\underline{I}_{k,CFL} = A_{k,CFL} \cdot (\cos(\theta_{k,CFL}) + j \cdot \sin(\theta_{k,CFL})) \quad (Ec. 8.2)$$

$$\underline{I}_{k,LED} = A_{k,LED} \cdot (\cos(\theta_{k,LED}) + j \cdot \sin(\theta_{k,LED})) \quad (Ec. 8.3)$$

$$\underline{I}_{k,PC} = A_{k,PC} \cdot (\cos(\theta_{k,PC}) + j \cdot \sin(\theta_{k,PC})) \quad (Ec. 8.4)$$

Además, los coeficientes n_{CFL} , n_{LED} y n_{PC} que multiplican a los respectivos fasores de corriente no son más que el número de cargas no lineales de cada tipo que hay conectadas al PCC. Tomando como valores para esos coeficientes $n_{CFL} = 1000$, $n_{LED} = 1000$ y $n_{PC} = 70$, se muestran a continuación la forma de onda de la corriente consumida por la carga agregada no lineal, así como los espectros completo y armónico asociados a esa forma de onda.

Forma de onda de la intensidad consumida:

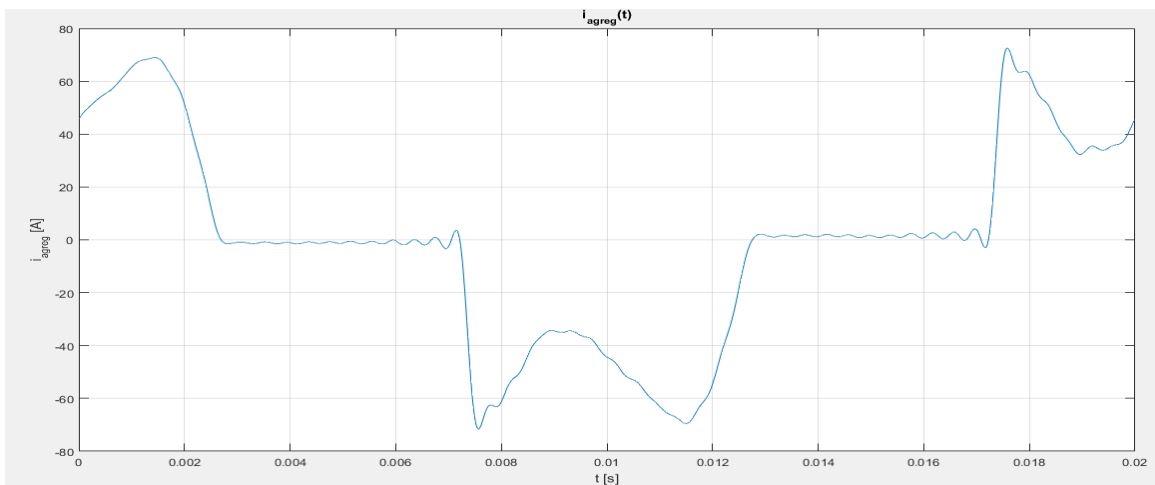


Figura. 8.10. Forma de onda de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro completo de la intensidad consumida:

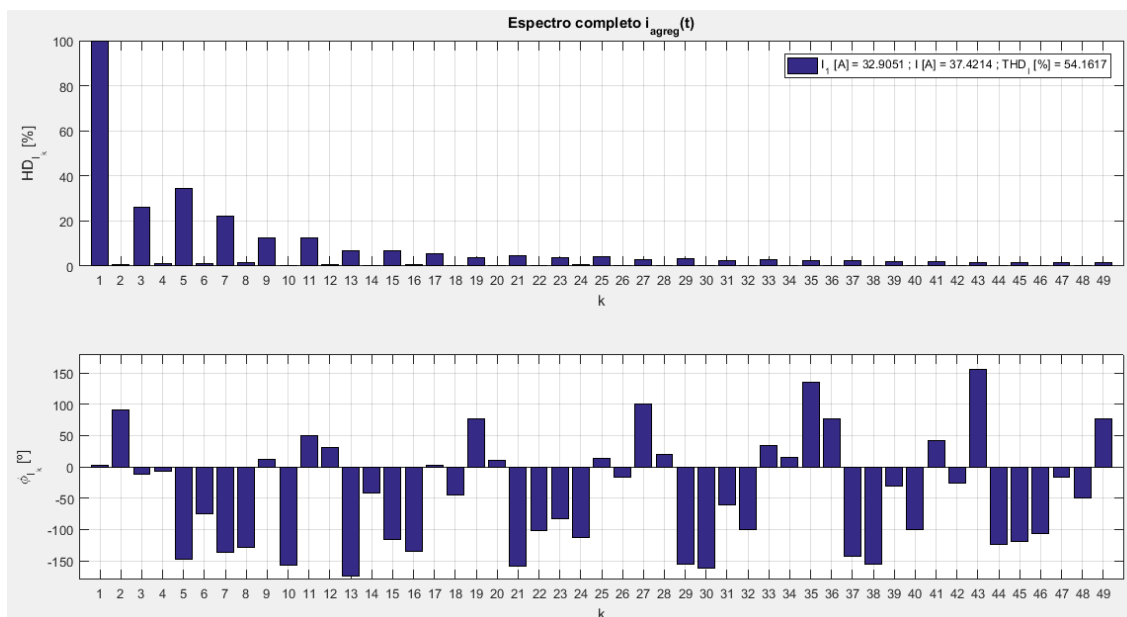


Figura. 8.11. Espectro completo de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Espectro armónico de la intensidad consumida:

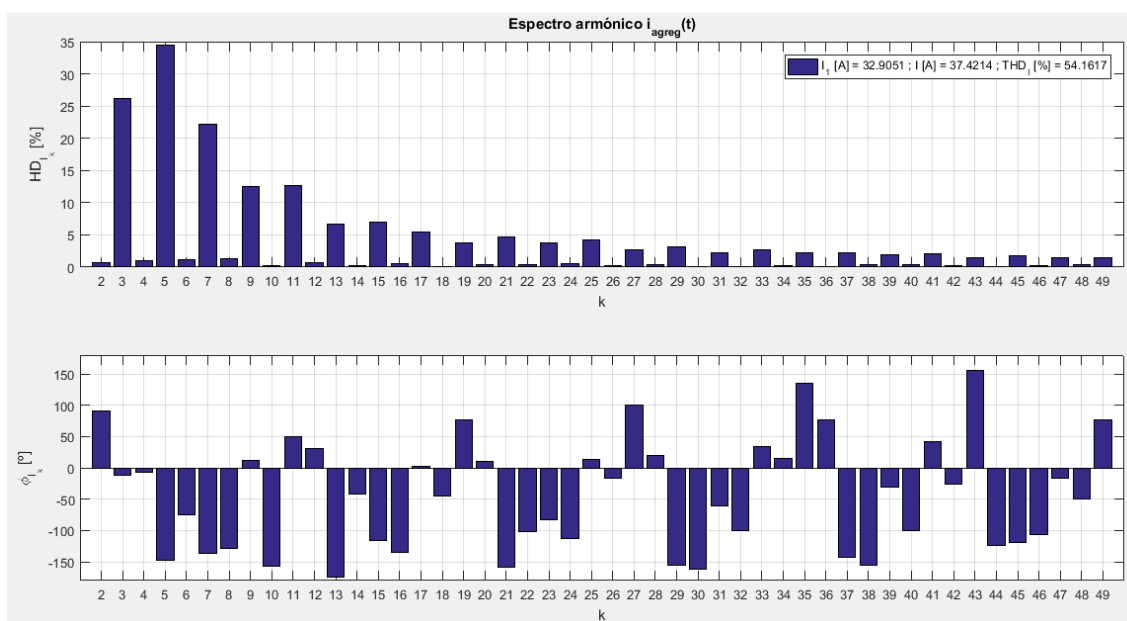


Figura. 8.12. Espectro armónico de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Se consigue una corriente total consumida por la carga agregada no lineal con un THD más reducido que el de cualquiera de las corrientes consumidas individualmente por cada una de las cargas no lineales integrantes del grupo.

9. Estudios de penetración armónica en redes de distribución

En este apartado se procederá al estudio de la red de distribución con dos escenarios posibles:

- Escenario 1: Consumos compuestos por carga lineal, carga agregada no lineal y sin presencia de batería de condensadores.
- Escenario 2: Consumos compuestos por carga lineal, carga agregada no lineal y con presencia de batería de condensadores.

9.1. Escenario 1

En este primer estudio de la red de distribución, todos los nudos donde se conectan cargas (11 a 26), están alimentando un consumo compuesto por carga lineal, carga agregada no lineal y con ausencia de batería de condensadores.

9.1.1. Datos asociados a todos los elementos de la red

- Tensiones base de los buses en valores reales

Tensiones base de los buses	
Bus	Tensión (kV)
1	220
2 a 4	33
5 a 10	11
11 a 26	0,4

Tabla. 9.1. Tensiones base de los buses en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de los transformadores en valores reales

Transformadores				
Nombre	S nominal (MVA)	V nominal primario (kV)	V nominal secundario (kV)	Ucc (%)
Tr 1	100	220	33	10
Tr 2a3	10	33	11	8
Tr 4a19	0,3	11	0,4	4

Tabla. 9.2. Datos de los transformadores en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de las líneas en valores reales

Líneas					
Nombre	R (Ω /km)	L (H/km)	B (S/km)	l (km)	X (Ω /km)
L1	0,025	0,00033104	0,00E+00	40	0,103999283
L2	0,41	0,00032468	0,00E+00	10	0,10200123

Tabla. 9.3. Datos de las líneas en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de la carga lineal en valores reales

Carga lineal	
Potencia (kW)	FP
3	0,8 (i)

Tabla. 9.4. Datos de carga lineal en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de la carga agregada no lineal en valores reales

Carga agregada no lineal		
nLED	nCFL	nPC
1000	1000	70

Tabla. 9.5. Datos de la carga agregada no lineal en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de las líneas en PU

Líneas		
Nombre	R (pu)	X (pu)
L1	0,091827	0,381999
L2	3,388430	0,842985

Tabla. 9.6. Datos de las líneas en PU para la onda fundamental. [Fuente: propia].

Armónico 3		
	R (pu)	X (pu)
L1	0,091827	1,145998
L2	3,388430	2,528956
Armónico 5		
L1	0,091827	1,909996
L2	3,388430	4,214927
Armónico 7		
L1	0,091827	2,673994
L2	3,388430	5,900898
Armónico 9		

L1	0,091827	3,437993
L2	3,388430	7,586868
Armónico 11		
L1	0,091827	4,201991
L2	3,388430	9,272839
Armónico 13		
L1	0,091827	4,965990
L2	3,388430	10,958810
Armónico 15		
L1	0,091827	5,729988
L2	3,388430	12,644781
Armónico 17		
L1	0,091827	6,493986
L2	3,388430	14,330751
Armónico 19		
L1	0,091827	7,257985
L2	3,388430	16,016722

Tabla. 9.7. Datos de las líneas en PU para los armónicos. [Fuente: propia].

- Datos de los transformadores en PU

Transformadores		
Nombre	Rcc (pu)	Xcc (pu)
Tr 1	0,005	0,100000
Tr 2a3	0,04	0,800000
Tr 4a19	0,666666667	13,333333

Tabla. 9.8. Datos de los transformadores en PU para la onda fundamental. [Fuente: propia].

Armónico 3		
	Rcc (pu)	Xcc (pu)
Tr 1	0,005	0,300000
Tr 2a3	0,04	2,400000
Tr 4a19	0,666666667	40,000000
Armónico 5		
Tr 1	0,005	0,500000
Tr 2a3	0,04	4,000000
Tr 4a19	0,666666667	66,666667
Armónico 7		
Tr 1	0,005	0,700000
Tr 2a3	0,04	5,600000
Tr 4a19	0,666666667	93,333333
Armónico 9		
Tr 1	0,005	0,900000
Tr 2a3	0,04	7,200000
Tr 4a19	0,666666667	120,000000

Armónico 11		
Tr 1	0,005	1,100000
Tr 2a3	0,04	8,800000
Tr 4a19	0,666666667	146,666667
Armónico 13		
Tr 1	0,005	1,300000
Tr 2a3	0,04	10,400000
Tr 4a19	0,666666667	173,333333
Armónico 15		
Tr 1	0,005	1,500000
Tr 2a3	0,04	12,000000
Tr 4a19	0,666666667	200,000000
Armónico 17		
Tr 1	0,005	1,700000
Tr 2a3	0,04	13,600000
Tr 4a19	0,666666667	226,666667
Armónico 19		
Tr 1	0,005	1,900000
Tr 2a3	0,04	15,200000
Tr 4a19	0,666666667	253,333333

Tabla. 9.9. Datos de los transformadores en PU para los armónicos. [Fuente: propia].

9.1.2. Análisis de los resultados obtenidos

Se muestran a continuación la forma de onda de la intensidad consumida por la carga agregada no lineal conectada en el bus 26, así como los espectros completo y armónico asociados a esa forma de onda.

- Forma de onda de la intensidad consumida:

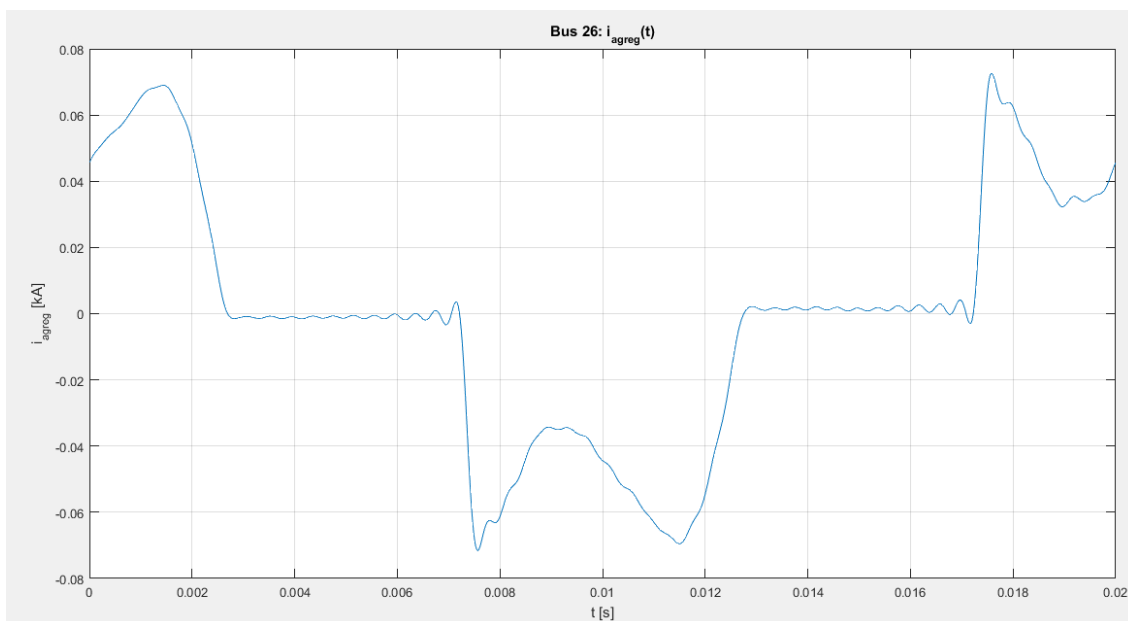


Fig. 9.1. Forma de onda de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

- Espectro completo de la intensidad consumida:

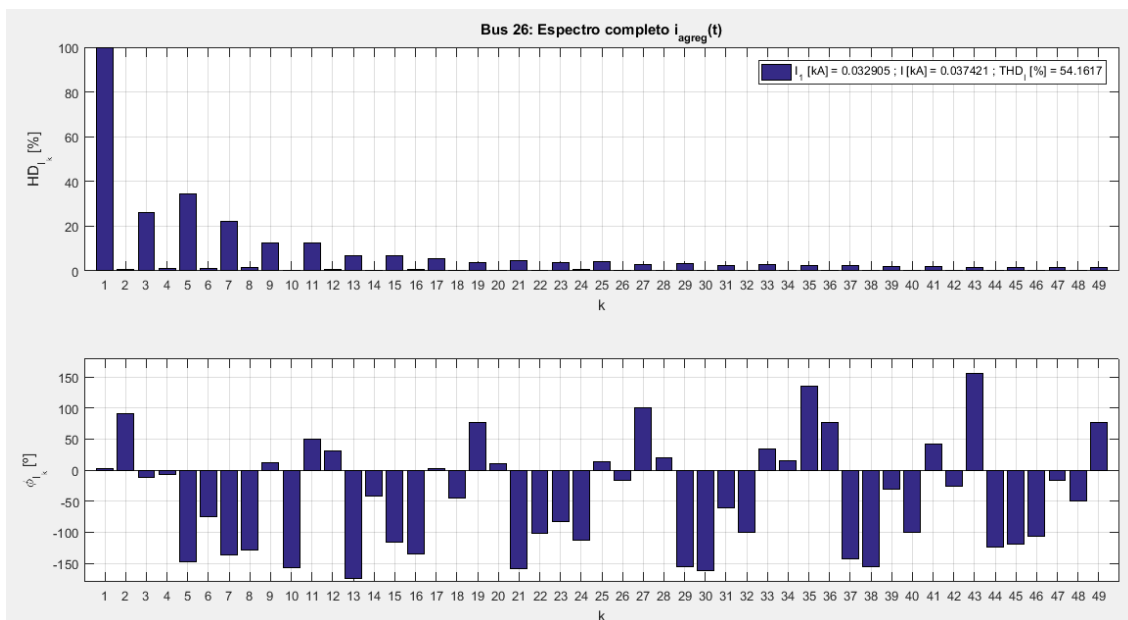


Fig. 9.2. Espectro completo de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la intensidad consumida:

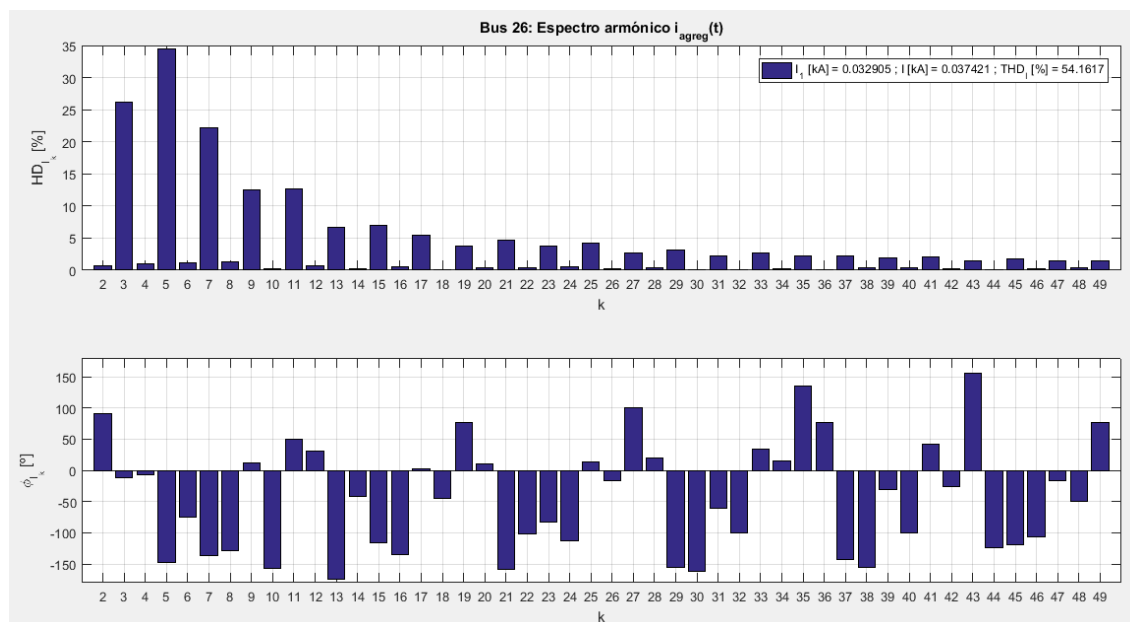


Fig. 9.3. Espectro armónico de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Se muestran a continuación la forma de onda de la tensión aparecida en el bus 26, así como los espectros completo y armónico asociados a esa forma de onda.

- Forma de onda de la tensión aparecida:

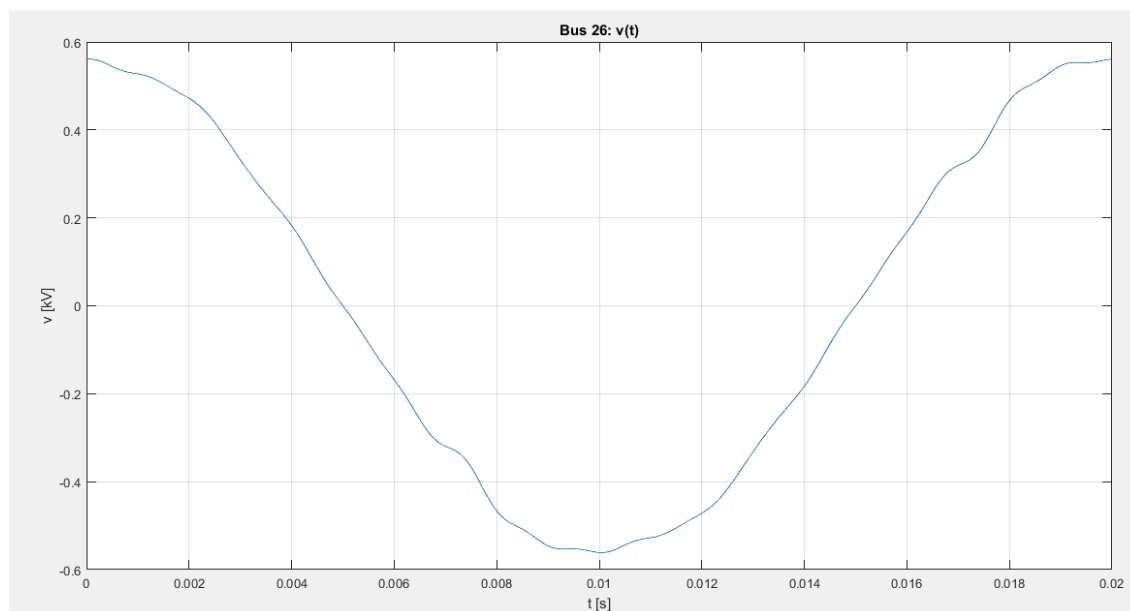


Fig. 9.4. Forma de onda de la tensión aparecida. [Fuente: propia].

- Espectro completo de la tensión aparecida:

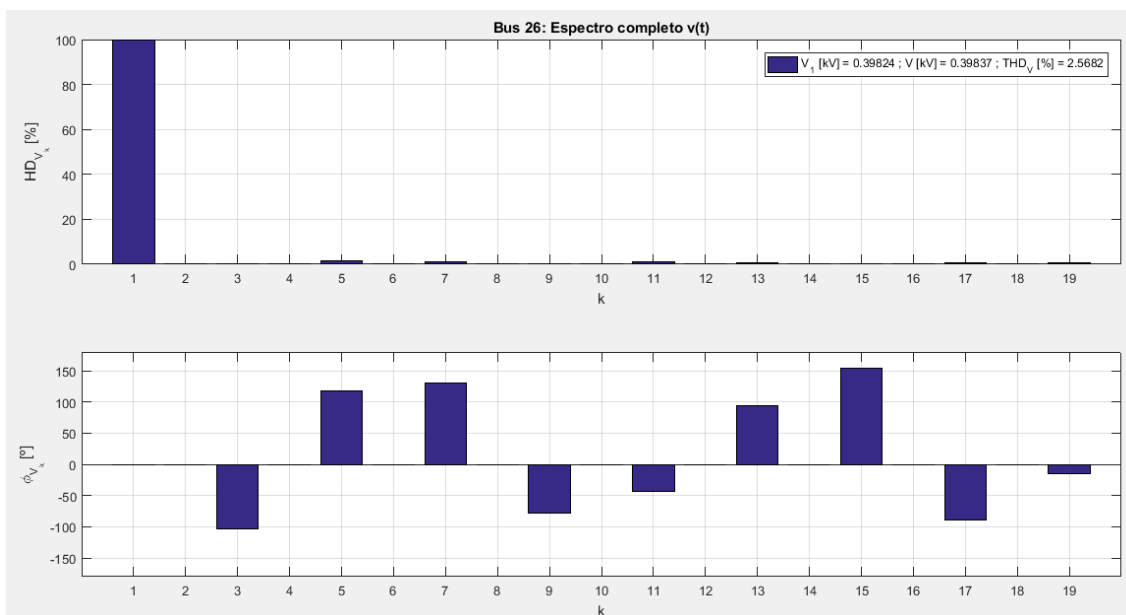


Fig. 9.5. Espectro completo de la tensión aparecida. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida:

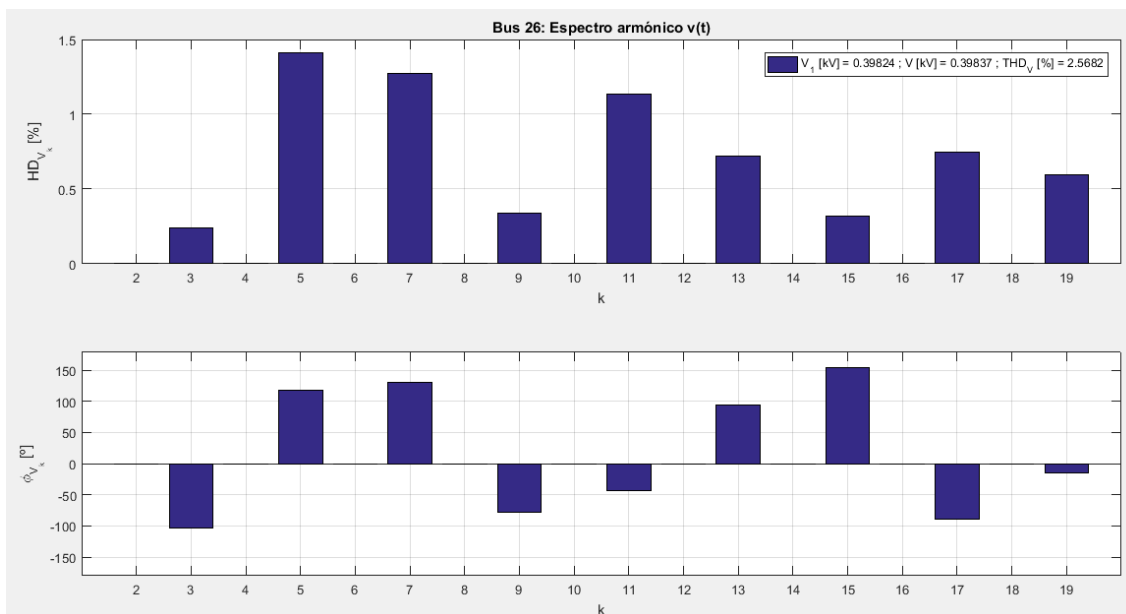


Fig. 9.6. Espectro armónico de la tensión aparecida. [Fuente: propia].

En los nudos que van del 11 al 26 se tiene una caída de tensión aproximada en el secundario de los correspondientes transformadores igual a $(|400 \text{ V} - 398 \text{ V}| / 400 \text{ V}) * 100 = 0.5\%$. La inyección de

corrientes distorsionadas por parte de las cargas agregadas no lineales hace aparecer en las tensiones de los nudos que van del 11 al 26 una ligera distorsión armónica total del 2.57% (no rebasándose el límite que marca la normativa). En los espectros armónicos de dichas tensiones, se observa que los armónicos de orden múltiplo de 3 no siguen el mismo patrón que el resto de armónicos por presentar la red de distribución una impedancia armónica diferente para órdenes múltiplos de 3 en comparación a la que presenta para otros órdenes (diferente modelo de los transformadores en función del orden del armónico considerado). En cambio, los armónicos de tensión cuyo orden no es múltiplo de 3 siguen un patrón similar al de las corrientes inyectadas.

Se muestran a continuación las formas de onda de la tensiones aparecidas en buses situados a diferentes distancias aguas arriba con respecto a los buses de los consumos (11 a 26), así como los espectros armónicos asociados a esas formas de onda.

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 10:

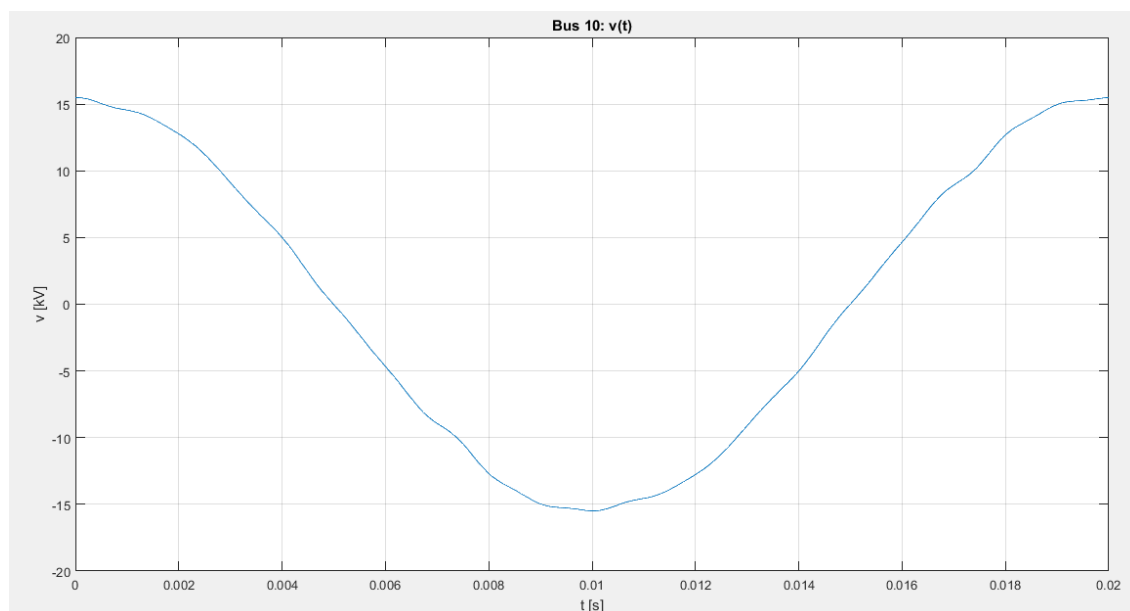


Fig. 9.7. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 10. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 10:

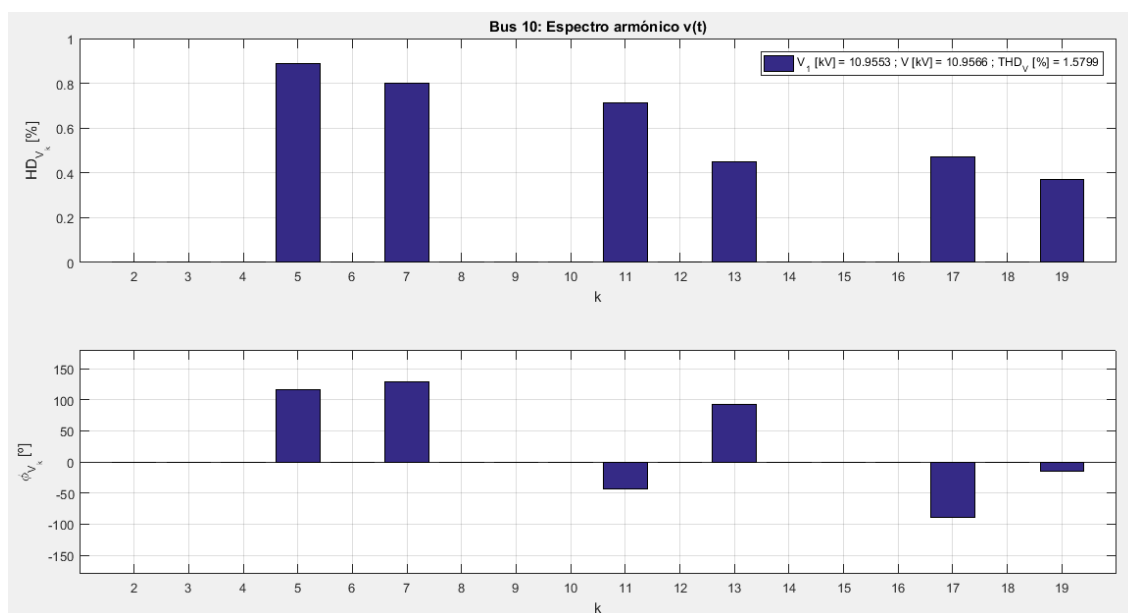


Fig. 9.8. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 10. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 6:

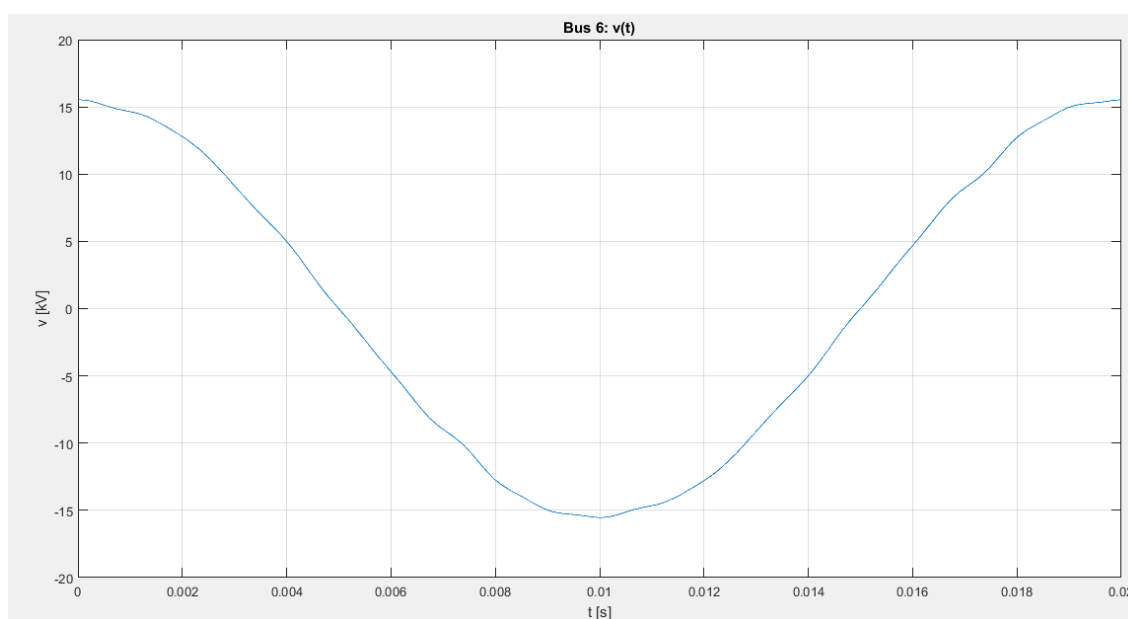


Fig. 9.9. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 6. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 6:

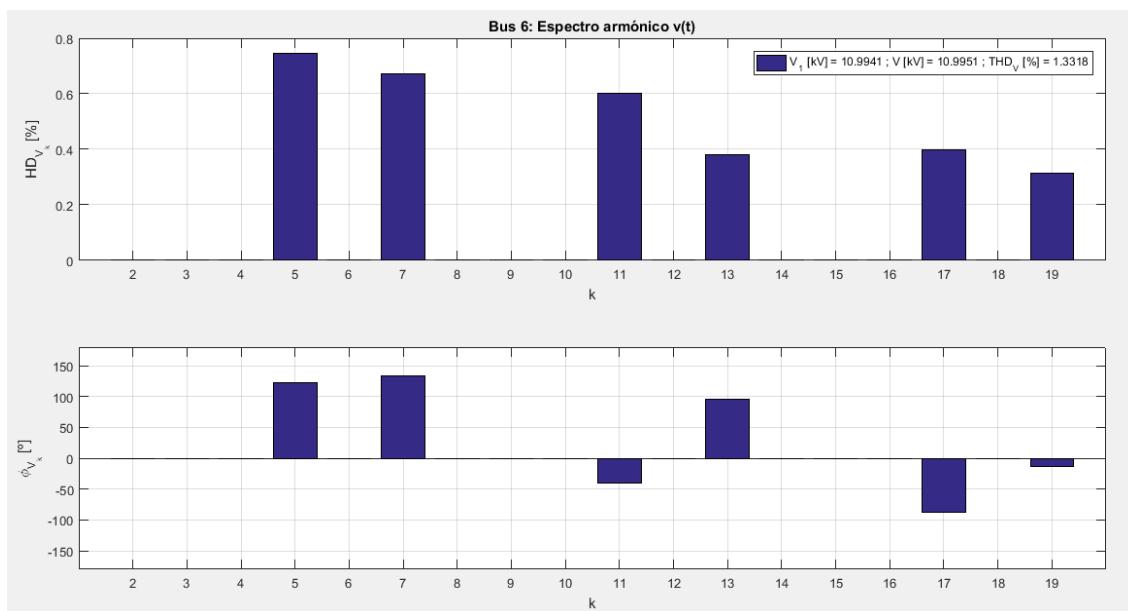


Fig. 9.10. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 6. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 4:

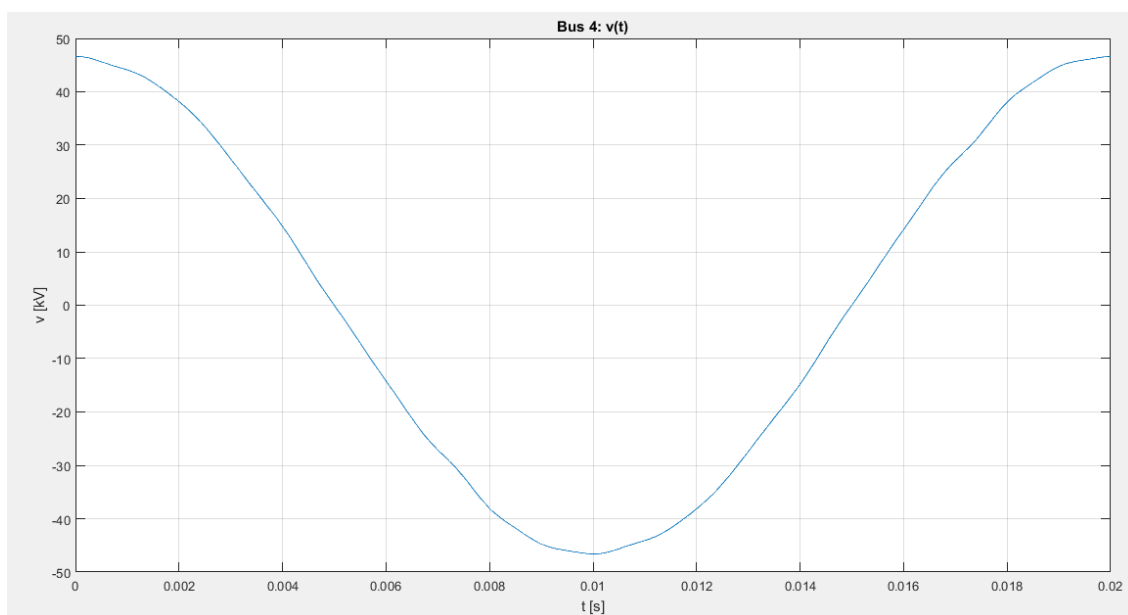


Fig. 9.11. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 4. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 4:

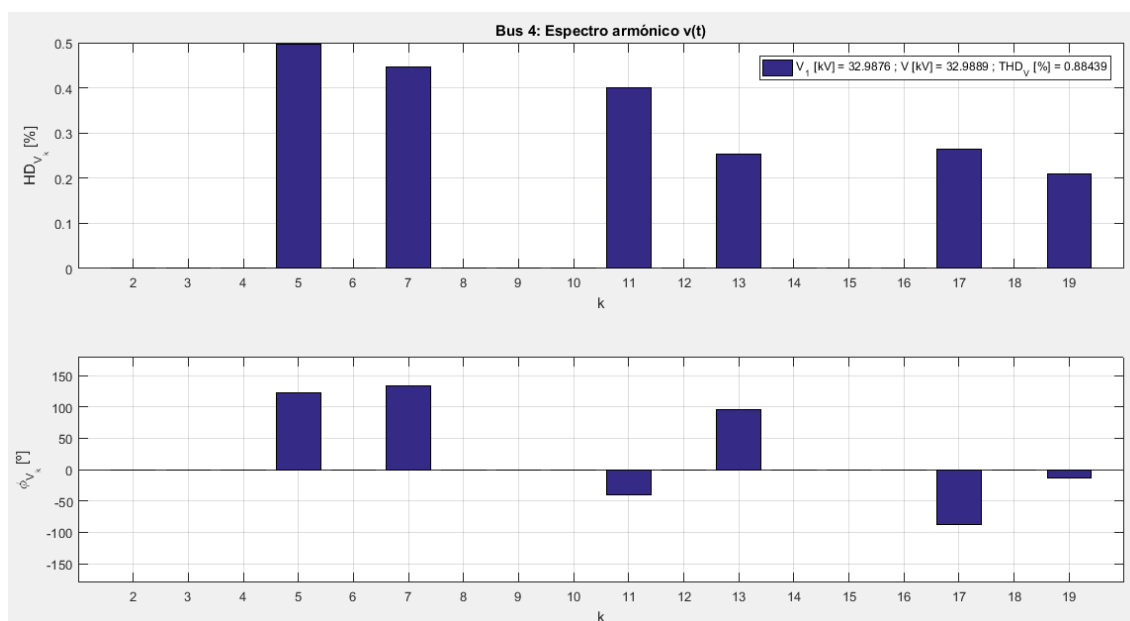


Fig. 9.12. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 4. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 2:

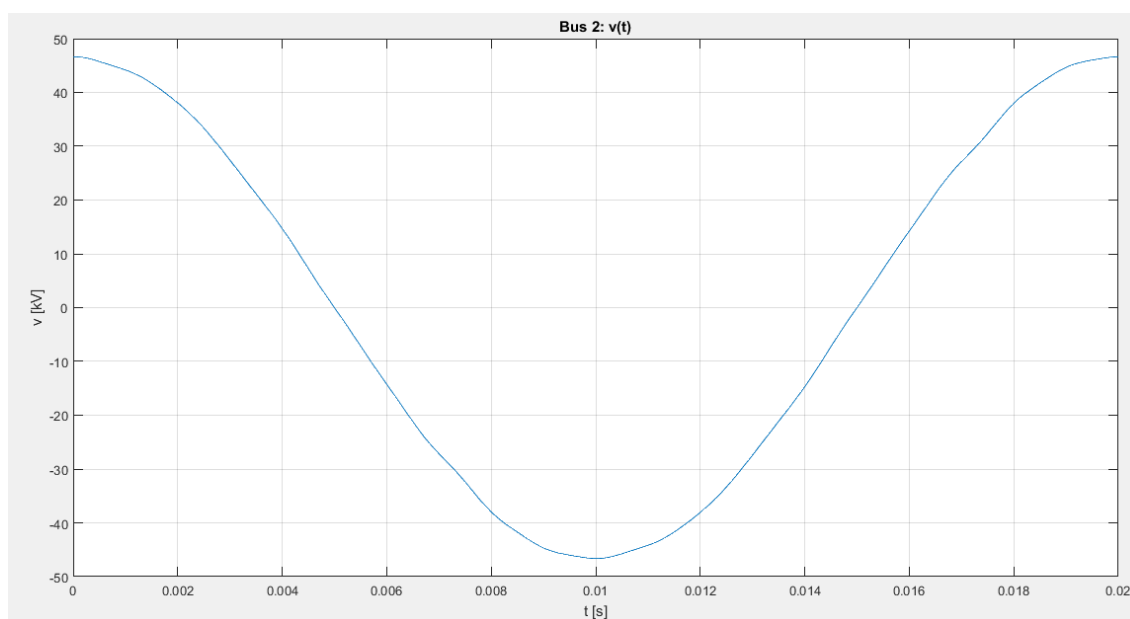


Fig. 9.13. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 2. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 2:

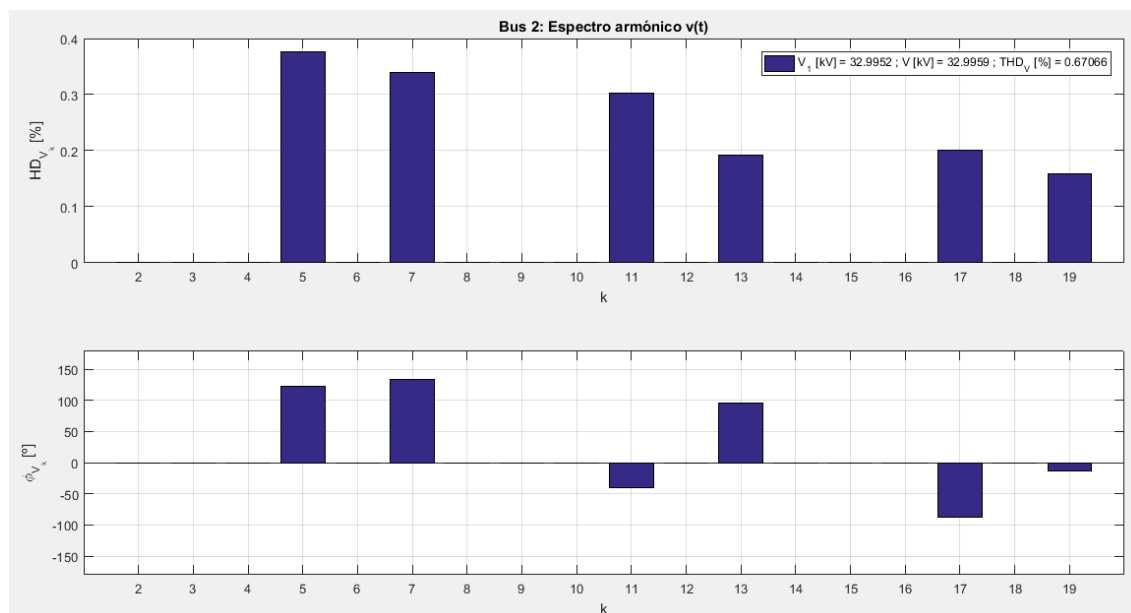


Fig. 9.14. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 2. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 1:

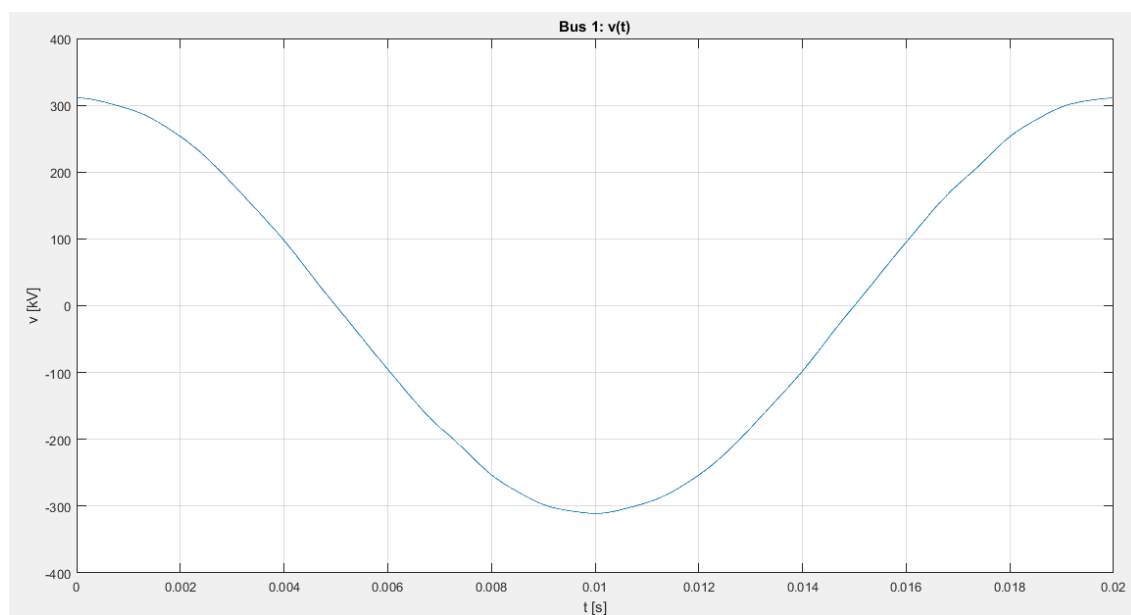


Fig. 9.15. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 1. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 1:

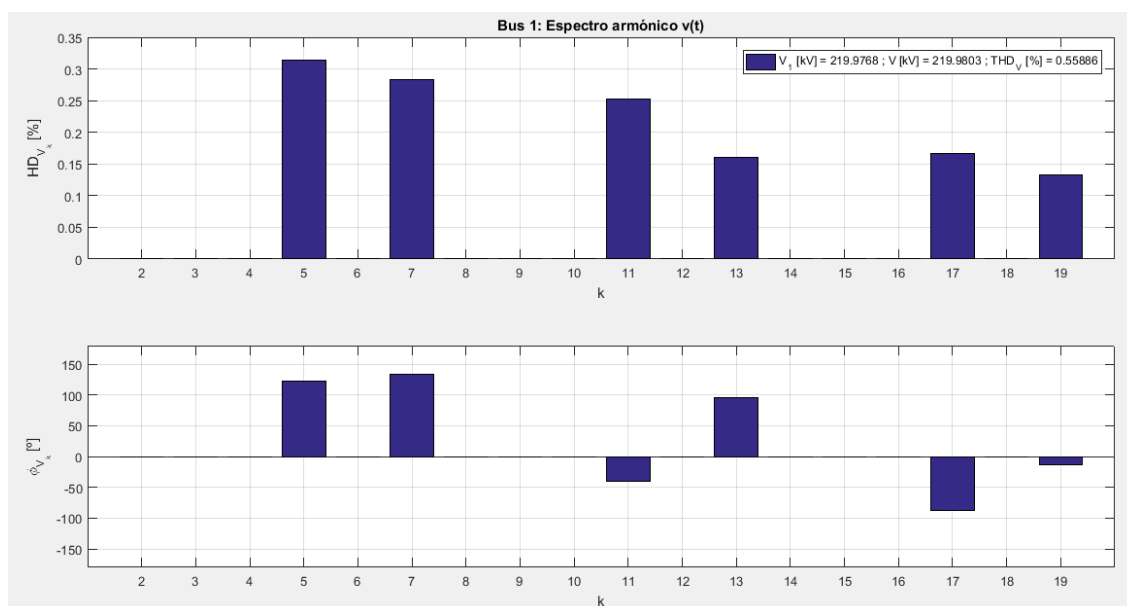


Fig. 9.16. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 1. [Fuente: propia].

Cuanto más aguas arriba está situado un nudo en la red de distribución con respecto a los nudos de los consumos (del 11 al 26), menor es la distorsión armónica total que presenta la tensión en dicho nudo debida a la inyección de corrientes distorsionadas por parte de las cargas agregadas no lineales. Esto se explica por la presencia de transformadores Yd y Dy que eliminan los armónicos de tensión múltiplos de 3 y también por el aumento de la caída de tensión distorsionada en un nudo cuanto mayor es la distancia respecto a los nudos de consumo.

9.2. Escenario 2

En este segundo estudio de la red de distribución, todos los nudos donde se conectan cargas (11 a 26), están alimentando un consumo compuesto por carga lineal, carga agregada no lineal y con presencia de batería de condensadores.

9.2.1. Datos asociados a todos los elementos de la red

- Tensiones base de los buses en valores reales

Tensiones base de los buses	
Bus	Tensión (kV)
1	220

2 a 4	33
5 a 10	11
11 a 26	0,4

Tabla. 9.10. Tensiones base de los buses en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de los transformadores en valores reales

Transformadores				
Nombre	S nominal (MVA)	V nominal primario (kV)	V nominal secundario (kV)	Ucc (%)
Tr 1	100	220	33	10
Tr 2a3	10	33	11	8
Tr 4a19	0,3	11	0,4	4

Tabla. 9.11. Datos de los transformadores en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de las líneas en valores reales

Líneas					
Nombre	R (Ω /km)	L (H/km)	B (S/km)	l (km)	X (Ω /km)
L1	0,025	0,00033104	0,00E+00	40	0,103999283
L2	0,41	0,00032468	0,00E+00	10	0,10200123

Tabla. 9.12. Datos de las líneas en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de la carga lineal en valores reales

Carga lineal	
Potencia (kW)	FP
3	0,8 (i)

Tabla. 9.13. Datos de carga lineal en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de la carga agregada no lineal en valores reales

Carga agregada no lineal		
nLED	nCFL	nPC
1000	1000	70

Tabla. 9.14. Datos de la carga agregada no lineal en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de la batería de condensadores (en Y) en valores reales

Batería de condensadores (en Y)
Capacidad por fase (uF)
143,5

Tabla. 9.15. Datos de la batería de condensadores (en Y) en valores reales. [Fuente: propia].

- Datos de las líneas en PU

Líneas		
Nombre	R (pu)	X (pu)
L1	0,091827	0,381999
L2	3,388430	0,842985

Tabla. 9.16. Datos de las líneas en PU para la onda fundamental. [Fuente: propia].

Armónico 3		
	R (pu)	X (pu)
L1	0,091827	1,145998
L2	3,388430	2,528956
Armónico 5		
	R (pu)	X (pu)
L1	0,091827	1,909996
L2	3,388430	4,214927

Armónico 7		
L1	0,091827	2,673994
L2	3,388430	5,900898
Armónico 9		
L1	0,091827	3,437993
L2	3,388430	7,586868
Armónico 11		
L1	0,091827	4,201991
L2	3,388430	9,272839
Armónico 13		
L1	0,091827	4,965990
L2	3,388430	10,958810
Armónico 15		
L1	0,091827	5,729988
L2	3,388430	12,644781
Armónico 17		
L1	0,091827	6,493986
L2	3,388430	14,330751
Armónico 19		
L1	0,091827	7,257985
L2	3,388430	16,016722

Tabla. 9.17. Datos de las líneas en PU para los armónicos. [Fuente: propia].

- Datos de los transformadores en PU

Transformadores		
Nombre	Rcc (pu)	Xcc (pu)
Tr 1	0,005	0,100000
Tr 2a3	0,04	0,800000
Tr 4a19	0,666666667	13,333333

Tabla. 9.18. Datos de los transformadores en PU para la onda fundamental. [Fuente: propia].

Armónico 3		
	Rcc (pu)	Xcc (pu)
Tr 1	0,005	0,300000
Tr 2a3	0,04	2,400000
Tr 4a19	0,666666667	40,000000
Armónico 5		
Tr 1	0,005	0,500000
Tr 2a3	0,04	4,000000
Tr 4a19	0,666666667	66,666667
Armónico 7		
Tr 1	0,005	0,700000
Tr 2a3	0,04	5,600000
Tr 4a19	0,666666667	93,333333
Armónico 9		
Tr 1	0,005	0,900000
Tr 2a3	0,04	7,200000
Tr 4a19	0,666666667	120,000000

Armónico 11		
Tr 1	0,005	1,100000
Tr 2a3	0,04	8,800000
Tr 4a19	0,666666667	146,666667
Armónico 13		
Tr 1	0,005	1,300000
Tr 2a3	0,04	10,400000
Tr 4a19	0,666666667	173,333333
Armónico 15		
Tr 1	0,005	1,500000
Tr 2a3	0,04	12,000000
Tr 4a19	0,666666667	200,000000
Armónico 17		
Tr 1	0,005	1,700000
Tr 2a3	0,04	13,600000
Tr 4a19	0,666666667	226,666667
Armónico 19		
Tr 1	0,005	1,900000
Tr 2a3	0,04	15,200000
Tr 4a19	0,666666667	253,333333

Tabla. 9.19. Datos de los transformadores en PU para los armónicos. [Fuente: propia].

9.2.2. Análisis de los resultados obtenidos

Se muestran a continuación la forma de onda de la intensidad consumida por la carga agregada no lineal conectada en el bus 26, así como los espectros completo y armónico asociados a esa forma de onda.

- Forma de onda de la intensidad consumida:

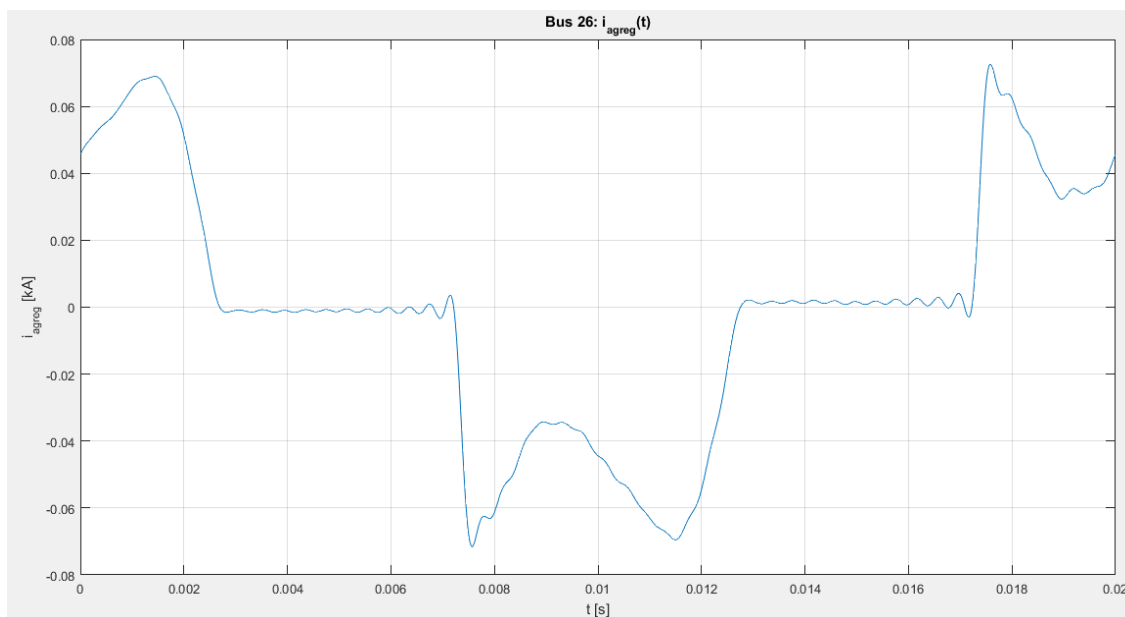


Fig. 9.17. Forma de onda de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

- Espectro completo de la intensidad consumida:

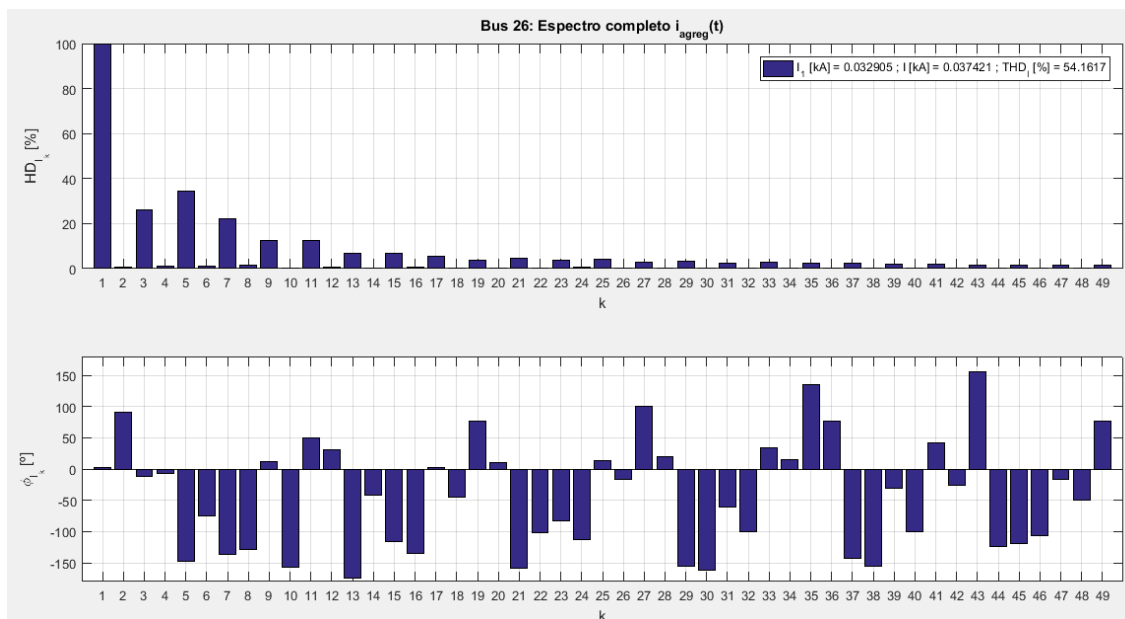


Fig. 9.18. Espectro completo de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la intensidad consumida:

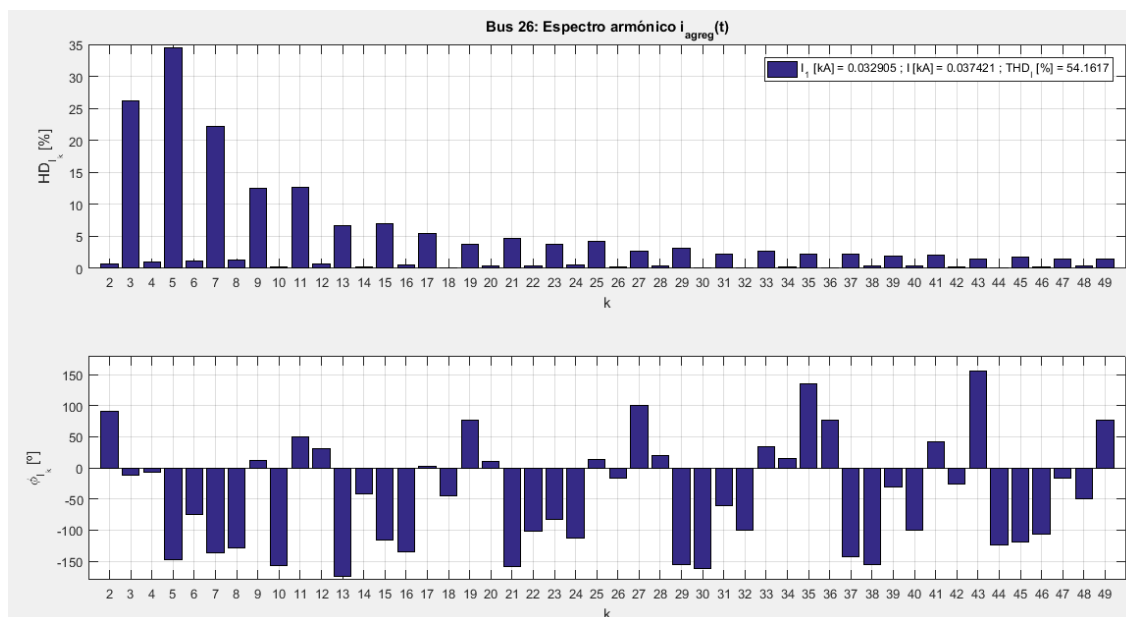


Fig. 9.19. Espectro armónico de la intensidad consumida. [Fuente: propia].

Se muestran a continuación la forma de onda de la tensión aparecida en el bus 26, así como los espectros completo y armónico asociados a esa forma de onda.

- Forma de onda de la tensión aparecida:

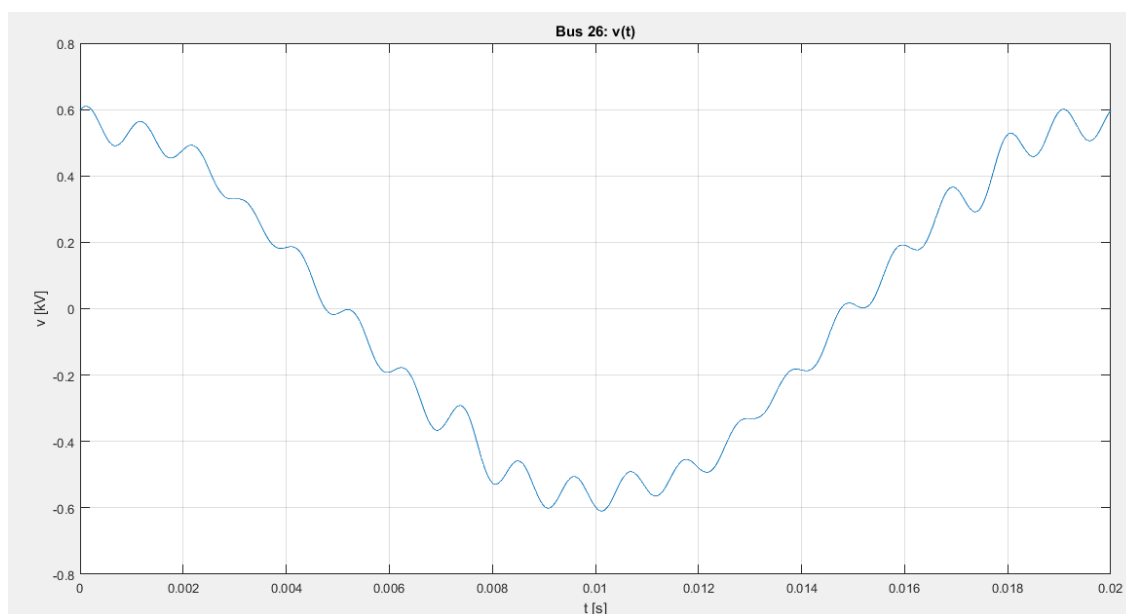


Fig. 9.20. Forma de onda de la tensión aparecida. [Fuente: propia].

- Espectro completo de la tensión aparecida:

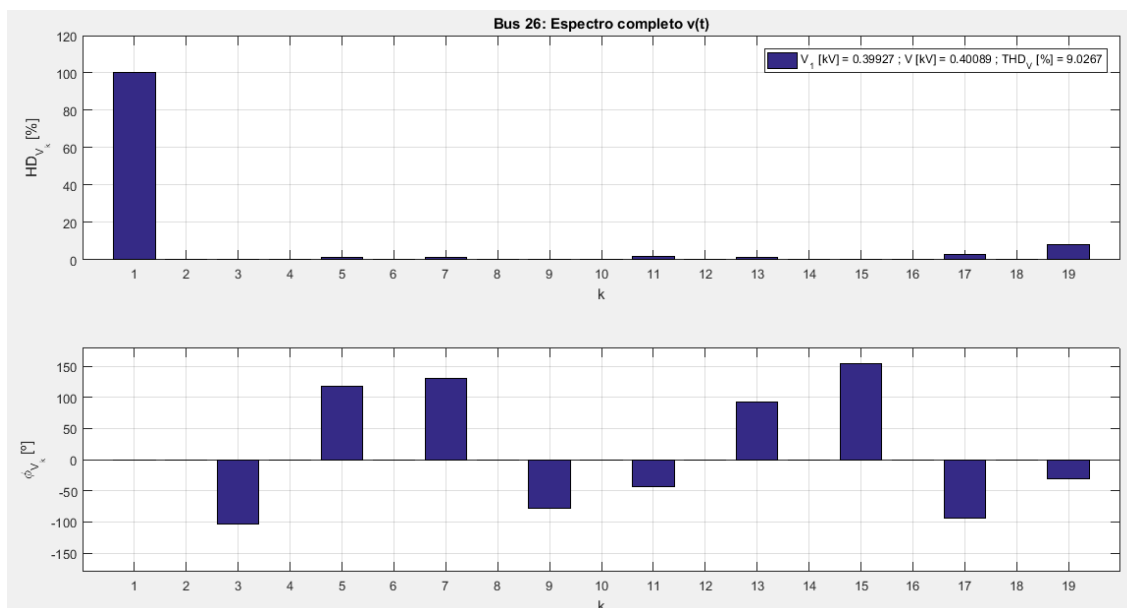


Fig. 9.21. Espectro completo de la tensión aparecida. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida:

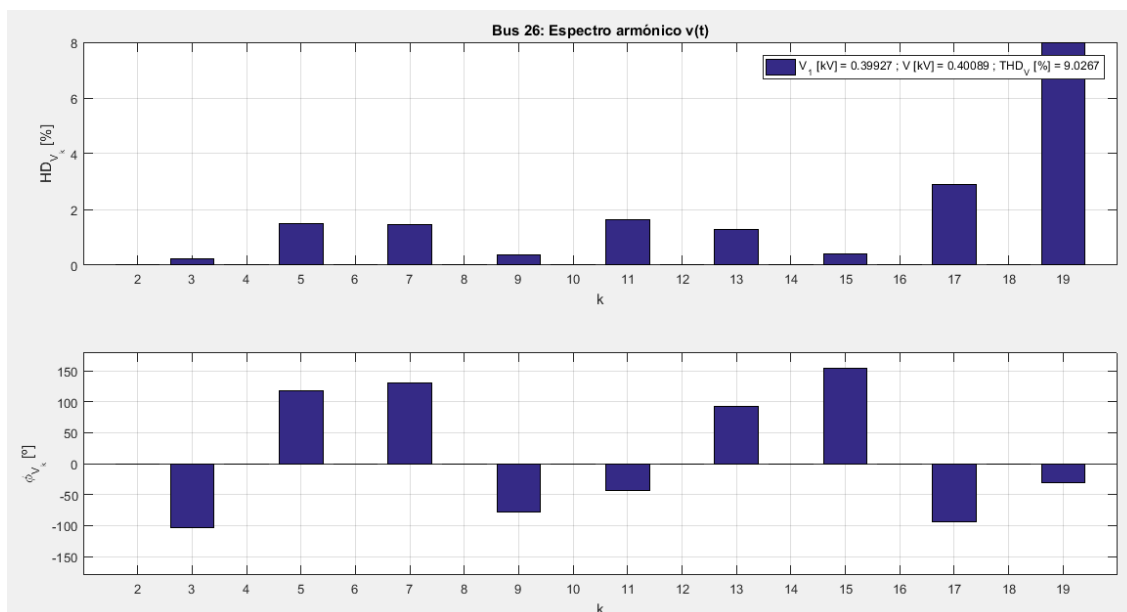


Fig. 9.22. Espectro armónico de la tensión aparecida. [Fuente: propia].

En los nudos que van del 11 al 26 se tiene una caída de tensión aproximada en el secundario de los correspondientes transformadores igual a $(|400 \text{ V} - 399 \text{ V}| / 400 \text{ V}) * 100 = 0.25\%$ (la presencia de baterías de condensadores permite elevar las tensiones en dichos nudos respecto a los valores que se tenían en el escenario 1, dando lugar a caídas de tensión en los secundarios de los transformadores más reducidas). La inyección de corrientes distorsionadas por parte de las cargas agregadas no lineales

hace aparecer en las tensiones de los nudos que van del 11 al 26 una elevada distorsión armónica total del 9.03% (rebasándose el límite que marca la normativa). Es claro que debe haber una resonancia paralelo próxima al armónico de orden 19 de forma que la tensión armónica de ese orden aumenta mucho, llegando a ser el valor de THDV aproximadamente igual al de HDV19. Se debería disminuir la tensión armónica de orden 19 bien reduciendo la corriente armónica inyectada de ese orden utilizando filtros activos, o bien instalando en los buses que van del 11 al 26, filtros pasivos que compensasen la misma potencia que las baterías de condensadores ya presentes y que además estuviesen sintonizados adecuadamente (normalmente al armónico de orden más bajo presente en la red de distribución) para reducir el valor de THDV a límites aceptables.

Se muestran a continuación las formas de onda de las tensiones aparecidas en buses situados a diferentes distancias aguas arriba con respecto a los buses de los consumos (11 a 26), así como los espectros armónicos asociados a esas formas de onda.

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 10:

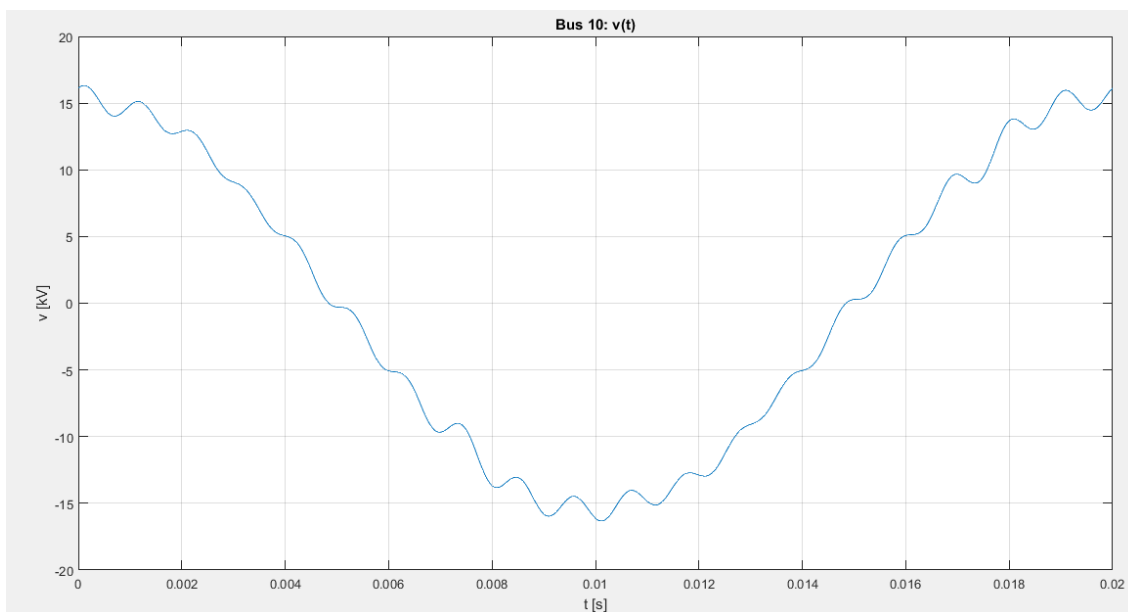


Fig. 9.23. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 10. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 10:

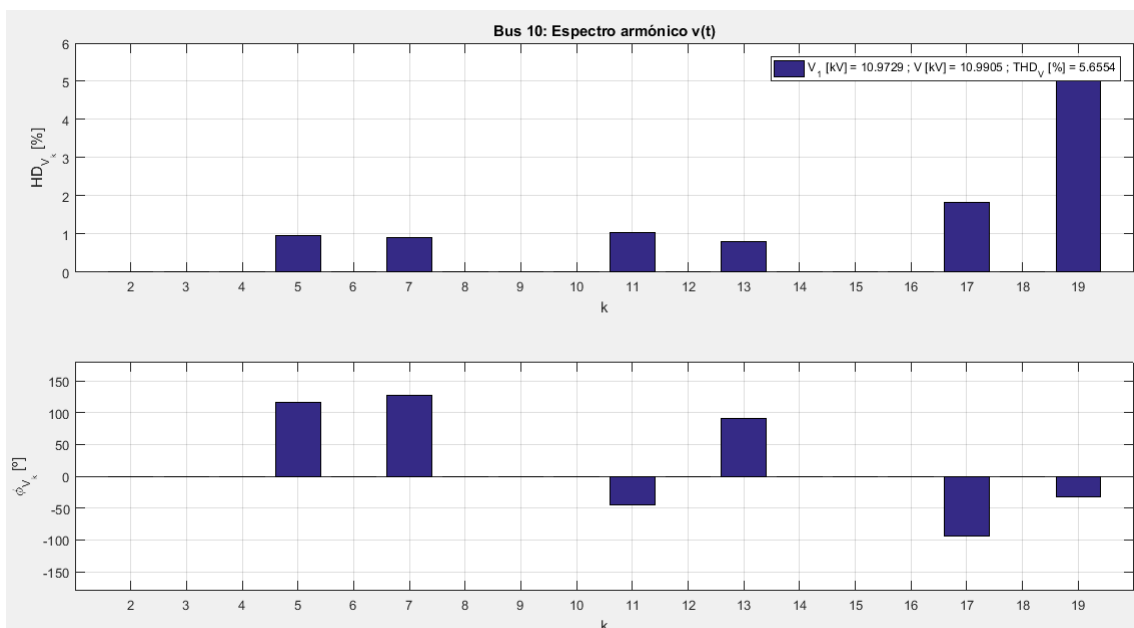


Fig. 9.24. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 10. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 6:

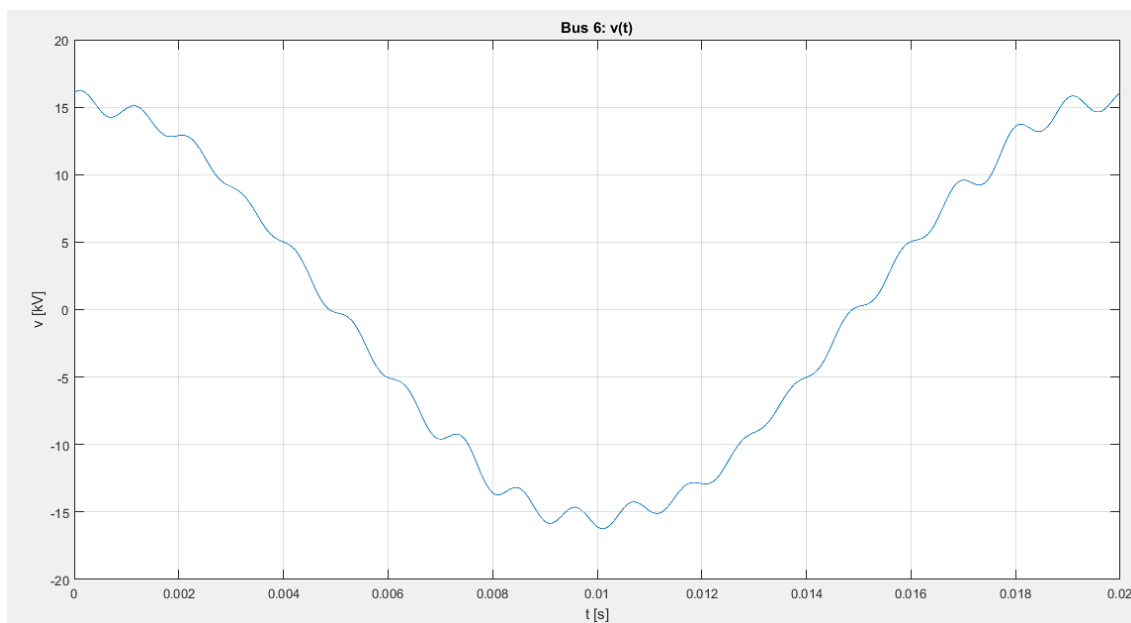


Fig. 9.25. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 6. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 6:

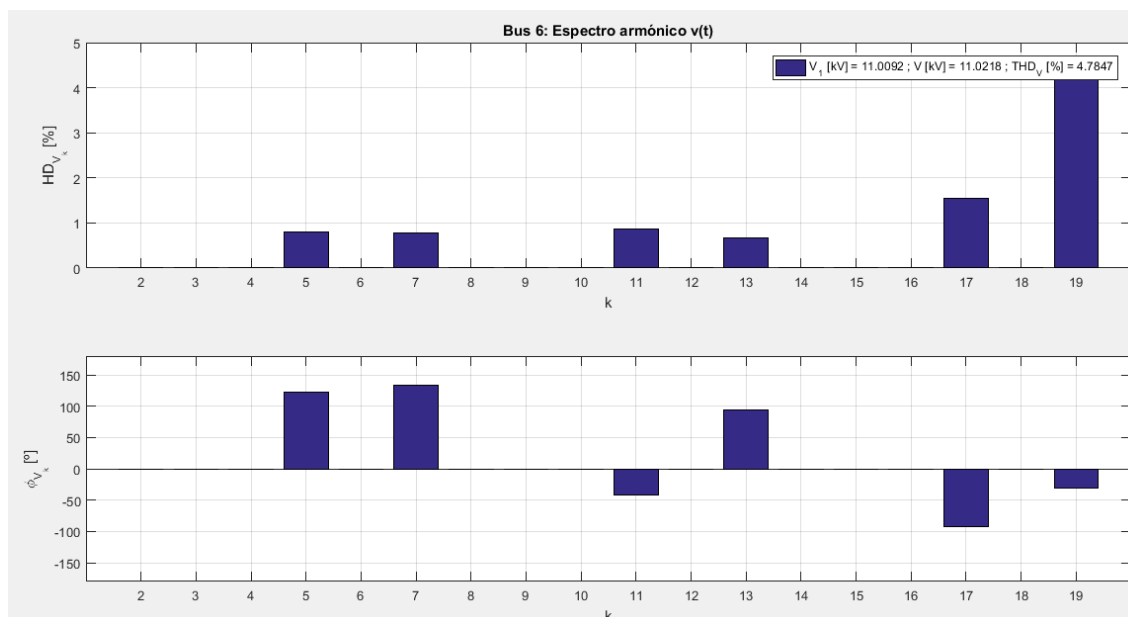


Fig. 9.26. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 6. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 4:

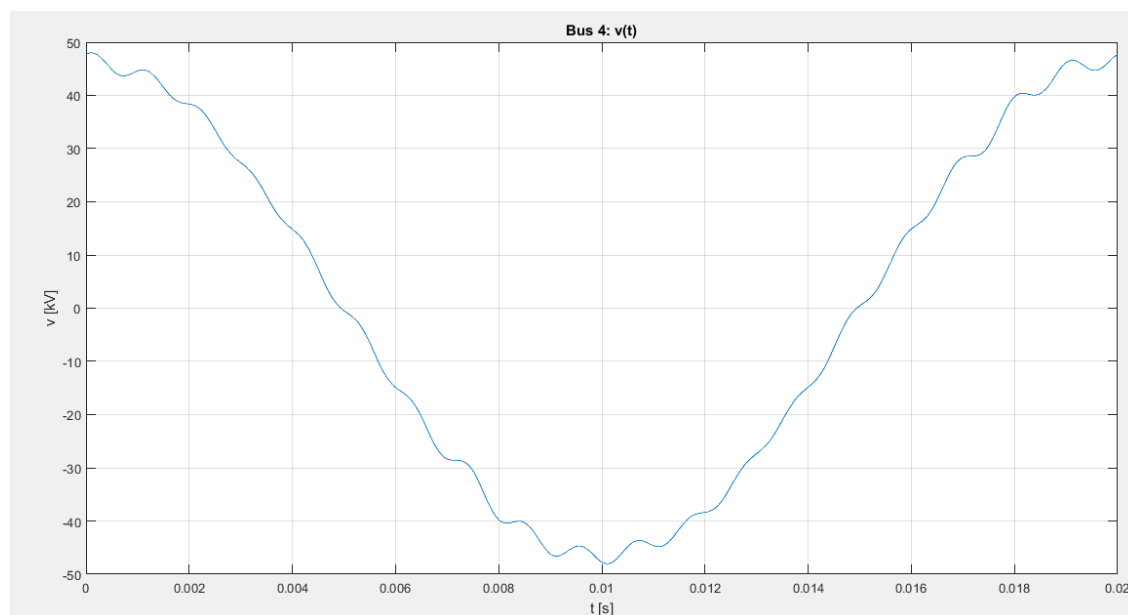


Fig. 9.27. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 4. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 4:

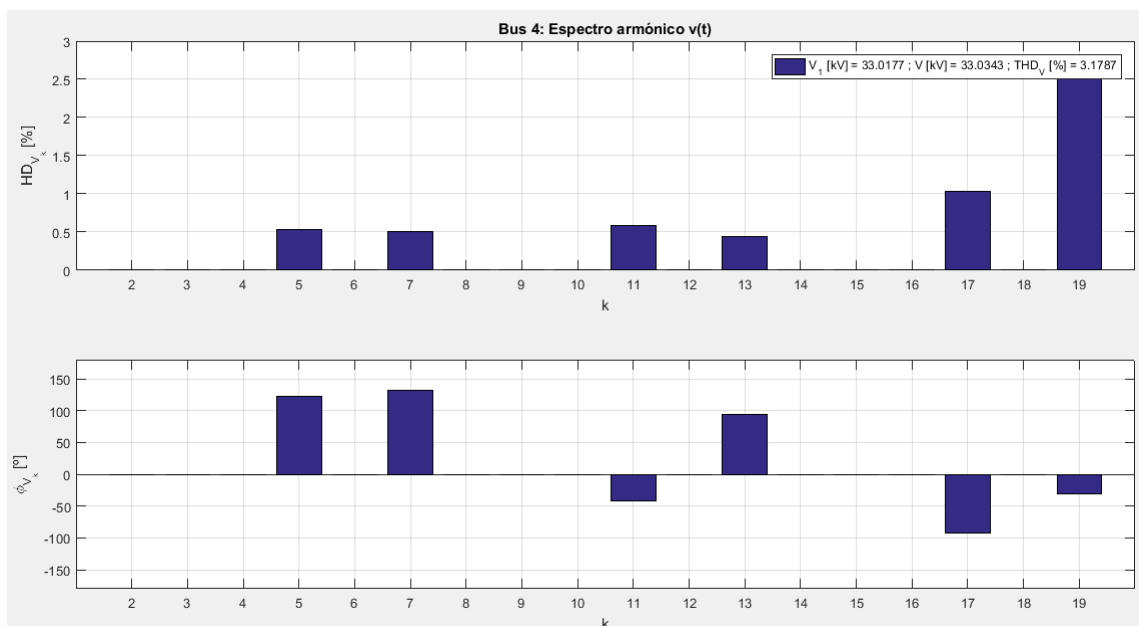


Fig. 9.28. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 4. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 2:

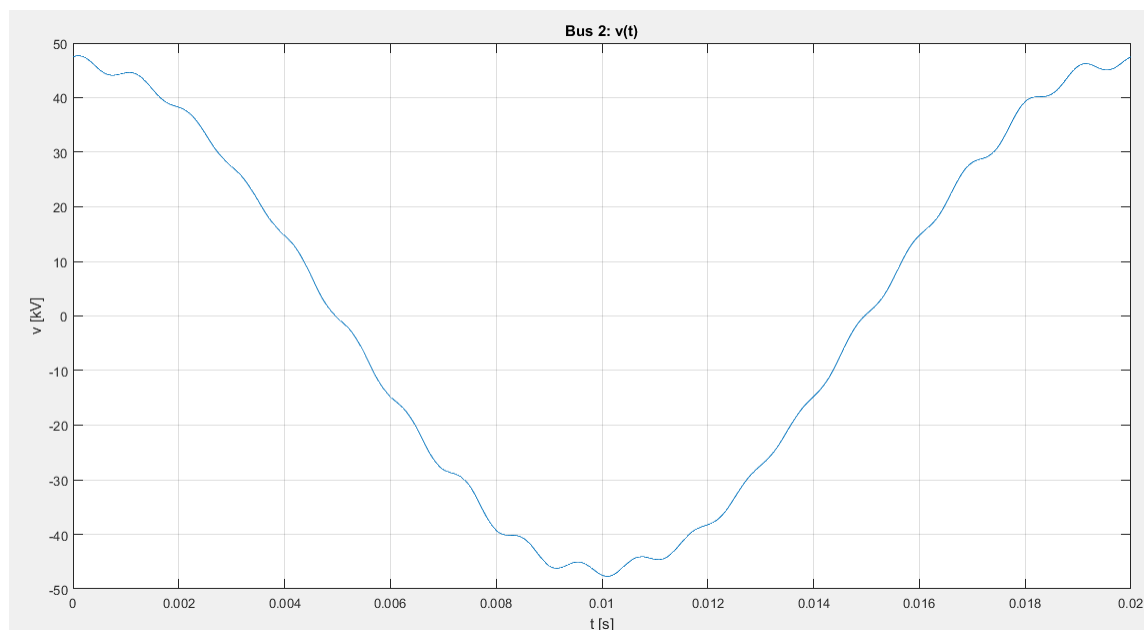


Fig. 9.29. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 2. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 2:

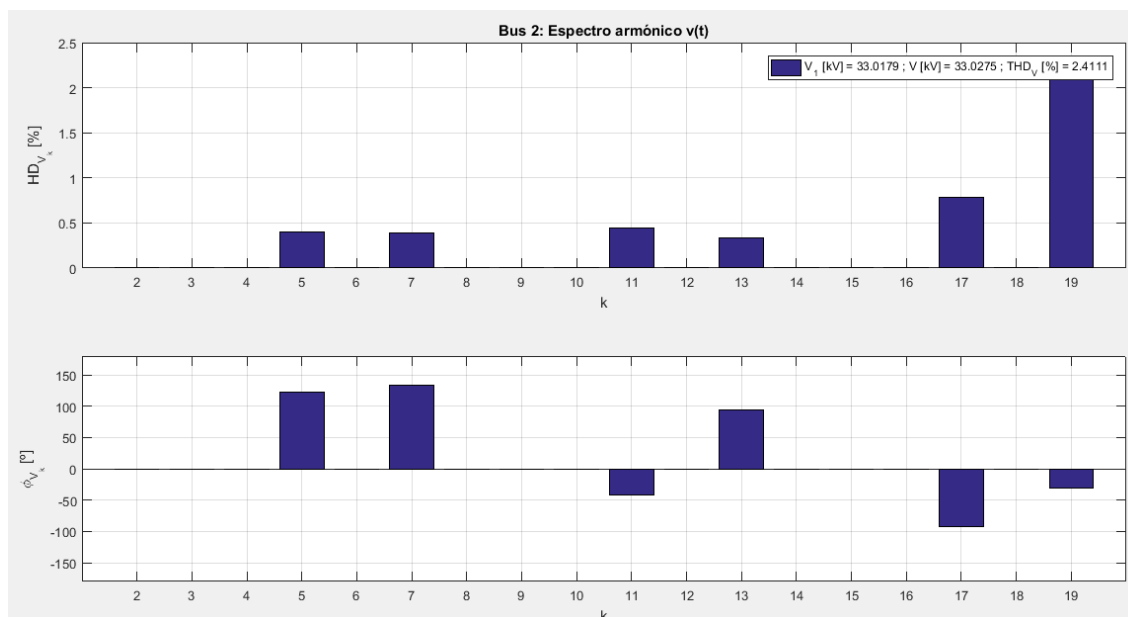


Fig. 9.30. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 2. [Fuente: propia].

- Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 1:

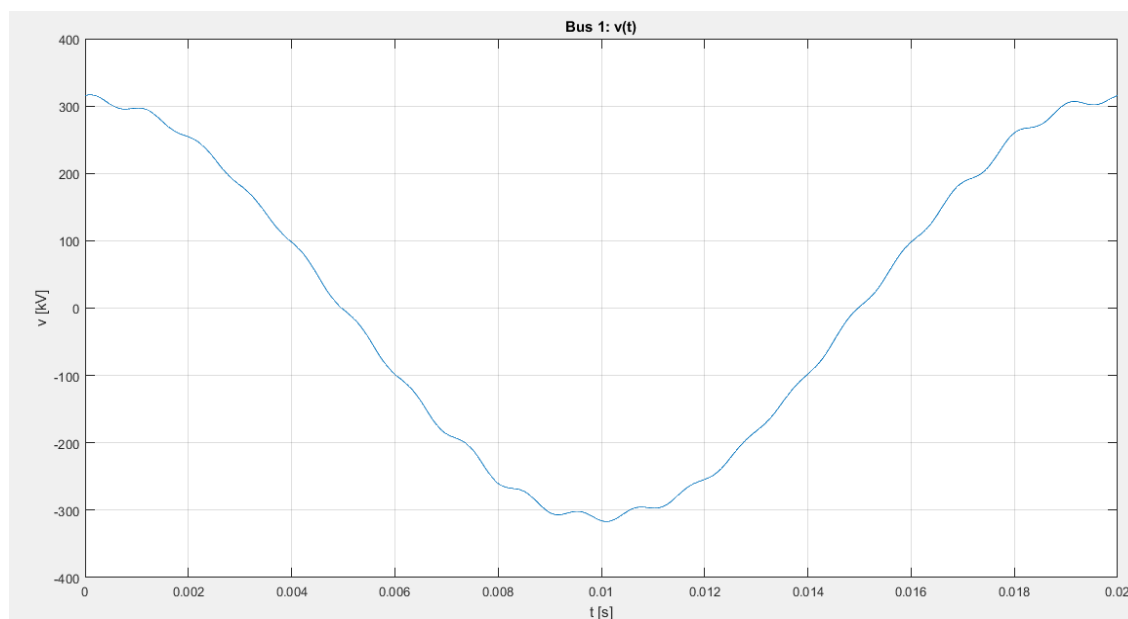


Fig. 9.31. Forma de onda de la tensión aparecida en el bus 1. [Fuente: propia].

- Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 1:

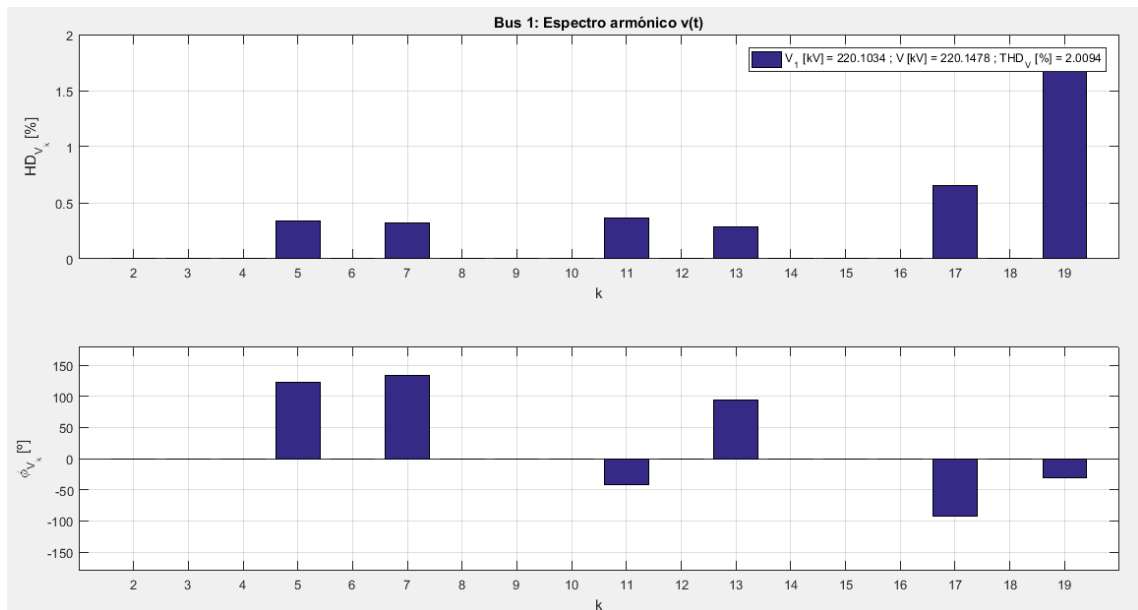


Fig. 9.32. Espectro armónico de la tensión aparecida en el bus 1. [Fuente: propia].

Igual que sucede en el escenario 1, cuanto más aguas arriba está situado un nudo en la red de distribución con respecto a los nudos de los consumos (del 11 al 26), menor es la distorsión armónica total que presenta la tensión en dicho nudo debida a la inyección de corrientes distorsionadas por parte de las cargas agregadas no lineales. Esto se explica por la presencia de transformadores Yd y Dy que eliminan los armónicos de tensión múltiplos de 3 y también por el aumento de la caída de tensión distorsionada en un nudo cuanto mayor es la distancia respecto a los nudos de consumo. No obstante, los valores de THDV que se han obtenido en los 6 buses considerados (26, 10, 6, 4, 2 y 1) son mayores que sus respectivos valores en el escenario 1.



10. Presupuesto

En el presente capítulo se procede a realizar un análisis económico del proyecto desarrollado. El análisis se va a descomponer en tres partes:

- Coste de los recursos humanos.
- Coste de los recursos materiales.
- Coste total del proyecto.

10.1. Coste de los recursos humanos

El coste de los recursos humanos, desglosado en diversos conceptos, se muestra a continuación:

CONCEPTO	CANTIDAD [horas]	PRECIO UNITARIO [€/hora]	COSTE [€]
Estudio y desarrollo teórico del proyecto.	140	20	2800
Implementación del motor de cálculo.	280	15	4200
Implementación de la interfaz gráfica.	200	15	3000
Validación del programa con ejemplos.	80	10	800
Elaboración de los documentos del proyecto.	300	9	2700
COSTE TOTAL DE LOS RECURSOS HUMANOS [€]:			13500

Tabla. 10.1: Coste de los recursos humanos. [Fuente: propia].

10.2. Coste de los recursos materiales

El coste de los recursos materiales, desglosado en diversos conceptos, se muestra a continuación:

CONCEPTO	COSTE [€]
Paquete informático MATLAB r.2016a 9.0 Student Version.	110
Consumo telefónico por: ▪ Consultas realizadas al director de proyecto. ▪ Conexión a Internet para obtener documentación.	60
Amortización de los equipos informáticos.	460
Fotocopias.	6
Material fungible (papel, cartuchos de tinta, ...).	54
Material oficial de la EEBE (cubiertas, carpetas, ...).	6
COSTE TOTAL DE LOS RECURSOS MATERIALES [€]:	696

Tabla. 10.2: Coste de los recursos materiales. [Fuente: propia].

10.3. Coste total del proyecto

El coste total del proyecto, desglosado en los costes totales anteriormente detallados y aplicando un 21 % de IVA se muestran en la siguiente tabla:

COSTE TOTAL DE LOS RECURSOS HUMANOS [€]:	13500
COSTE TOTAL DE LOS RECURSOS MATERIALES [€]:	696
COSTE TOTAL DEL PROYECTO SIN IVA [€]:	14196
IVA (21 %) [€]:	2981.16
COSTE TOTAL DEL PROYECTO [€]:	17177.16

Tabla. 10.3: Coste total del proyecto. [Fuente: propia].

11. Impacto medioambiental

Puesto que el proyecto no supone una actuación directa sobre el medioambiente no hay un impacto directo sobre éste. No obstante, la distribución de energía eléctrica afecta al medioambiente de diferentes maneras:

- Es necesario intervenir sobre el medioambiente para construir toda la red de distribución y para ello se modifica el medio natural edificando torres eléctricas e instalaciones transformadoras además de las correspondientes medidas de seguridad y las rutas de acceso para su mantenimiento. Esto modifica el paisaje y puede implicar la eliminación de la vegetación en las inmediaciones de la zona intervenida.
- En el aspecto acústico se destacan todas aquellas instalaciones transformadoras por ser una gran fuente de contaminación acústica. Por este motivo, en general, se sitúan lejos de zonas residenciales y se construyen con fuertes aislantes.
- Por otra parte, una red mal dimensionada implica unas pérdidas energéticas muy grandes durante el transporte de la energía. Esto supone un aumento en las necesidades productivas de los centros generadores, lo que implica un aumento en la contaminación atmosférica ya que al menos un tercio de la energía consumida en España proviene de centrales que generan energía mediante el uso de combustibles fósiles.
- Tal como se ha dicho anteriormente en el trabajo, una red con mucho contenido armónico hará que sus componentes tengan una esperanza de vida menor. Un aumento en la frecuencia de sustitución de los componentes de la red implica un aumento en la demanda de estos componentes y, por tanto, un aumento en las necesidades energéticas para fabricarlos.



12. Conclusiones

Mediante los apartados iniciales se ha podido definir y explicar teóricamente qué se entiende cuando se hace referencia al contenido armónico de una señal y qué supone la contaminación armónica para los elementos de una red de distribución.

A continuación, se ha detallado la modelización de la red de distribución o sistema y también el método de cálculo junto a sus principales características.

Finalmente se ha elaborado una herramienta informática basada en el programa MATLAB que da utilidad a la base de datos PANDA fuera de su web oficial y que permite personalizar con valores reales de consumo a una red de distribución típica para después poder calcular el contenido armónico mediante el método de la penetración armónica.

13. Bibliografía

- [1] CHAPMAN, D., "Harmonics. Causes and Effects.", Power Quality Application Guide, Vol. 3.1, March 2001 (Version 0b November 2001), p. 4-5.
- [2] BOIX, O. [et al.], "Tecnología Eléctrica. Electricidad Industrial. Tomo II.", CPDA-ETSEIB, Barcelona, 2000.
- [3] CARO, M., "Desarrollo de un programa para el estudio de sistemas eléctricos trifásicos con presencia de desequilibrios y armónicos.", Proyecto Final de Carrera, ETSEIB, UPC, Barcelona, 2002.
- [4] MANSOOR, A. [et al.], "An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads.", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, p. 467-473.
- [5] MANSOOR, A., GRADY, W. M., "Analysis of Compensation Factors Influencing the Net Harmonic Current Produced by Single-Phase Non-Linear Loads.", Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98), Athens, Greece, 1998, p. 883-889.
- [6] CHINDRIS, M., "Harmonic distortion in industrial systems.", DEE, ETSEIB, UPC, Barcelona, 1997.
- [7] MOLINA, J., MESAS, J.J., MESBAHI, N., SAINZ, L., "LED lamp modelling for harmonic studies in distribution systems", DEE, ETSEIB, UPC, Barcelona, 2016.

